



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen – Untersuchung des Verbundkriechens als Ursache für Rißbreitenvergrößerung

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

Dipl.-Ing. A. Rohling

Oktober 1984

B I B L I O T H E K

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

der Technischen Universität Braunschweig

Beethovenstraße 52

D-3300 Braunschweig

**Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen**

DAUERHAFTIGKEIT VON STAHLBETONBAUTEILEN - UNTERSUCHUNG DES VERBUNDKRIECHENS ALS URSACHE FÜR RISSBREITENVERGRÖßERUNG

Problemstellung und Zielsetzung

1. Bisherige Arbeiten - Literaturübersicht -

- 1.1 Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerlast
- 1.2 Verbundkriechuntersuchungen unter nichtruhender Belastung

2. Eigene Versuche

3. Ausbildung und Herstellung der Probekörper

4. Baustoffe

- 4.1 Bewehrungsstahl
- 4.2 Beton

5. Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

6. Ergebnisse der Kurzzeitversuche

7. Ergebnisse der Versuche unter nichtruhender Belastung

- 7.1 Einfluß der Unterspannung
- 7.2 Einfluß der Frequenz
- 7.3 Einfluß der bezogenen Rippenfläche
- 7.4 Einfluß der Betongüte
- 7.5 Einfluß des Belastungsalters
- 7.6 Verhalten der Probekörper bei statischer Belastung nach Lastwechsel

8. Ergebnisse der Dauerstandversuche

- 8.1 Verhalten der Probekörper bei statischer Belastung und konstanter Dauerbelastung

9. Vergleich des Verbundkriechverhaltens unter Zugschwellbeanspruchung und unter konstanter Dauerlast

10. Zusammenfassung

Problemstellung und Zielsetzung

Stahlbetonkonstruktionen weisen bereits im Gebrauchszustand Risse infolge Last- und/oder Zwangbeanspruchungen auf. Um den Korrosionsschutz der Bewehrung und damit die Dauerhaftigkeit der Tragwerke zu gewährleisten, sind die Rißbreiten in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen auf ein zulässiges Maß zu beschränken. Grundlage für die Festlegung kritischer Grenzwerte der Rißbreiten in den Stahlbetonnormen waren in erster Linie aus Kurzzeitversuchen abgeleitete empirische Rißformeln. Der Einfluß einer langzeitigen Beanspruchung wird bei den bestehenden Berechnungsverfahren nur sehr grob und unzuverlässig erfaßt (z.B. CEB/FIP-Mustervorschrift).

Langzeitbeobachtungen an Bauwerken zeigen jedoch, daß sich die Rißbreiten unter ruhenden bzw. nicht ruhenden Lasten im Laufe der Zeit vergrößern. Die Zunahme der Rißbreiten wird durch die Phänomene Betonkriechen und -schwinden sowie durch das Verbundkriechen verursacht.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, einen Beitrag zur Abschätzung der Verschiebungszunahme bzw. zur Rißbreitenvergrößerung infolge Verbundkriechen unter ruhenden, insbesondere jedoch unter nicht ruhenden Beanspruchungen zu liefern.

1. Bisherige Arbeiten - Literaturübersicht -

1.1 Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerlast

Die erste grundlegende Arbeit, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten des Verbundkriechens befaßt, stammt von Franke /1/. Franke führte Zeitstandversuche an Ausziehkörpern mit kurzer Verbundlänge, und zwar vorwiegend unter Verwendung von Kunstharzbeton, durch. Das zeitabhängige Verbundverhalten von Stahl in Normalbeton wurde nur in einigen Tastversuchen abgeschätzt, zeigte jedoch keine prin-

ziptuellen Unterschiede. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ergaben - bei einer Darstellung der gemessenen zeitabhängigen Verschiebungswerte $v(t)$ im doppel-logarithmischen Maßstab - lineare $v(t)$ - t -Beziehungen. Die bei unterschiedlichen Beanspruchungshöhen ermittelten Beziehungen verliefen parallel zueinander, solange die Dauerlast unterhalb von etwa 60 % der Kurzzeitverbundbruchlast lag (Bild 1.1).

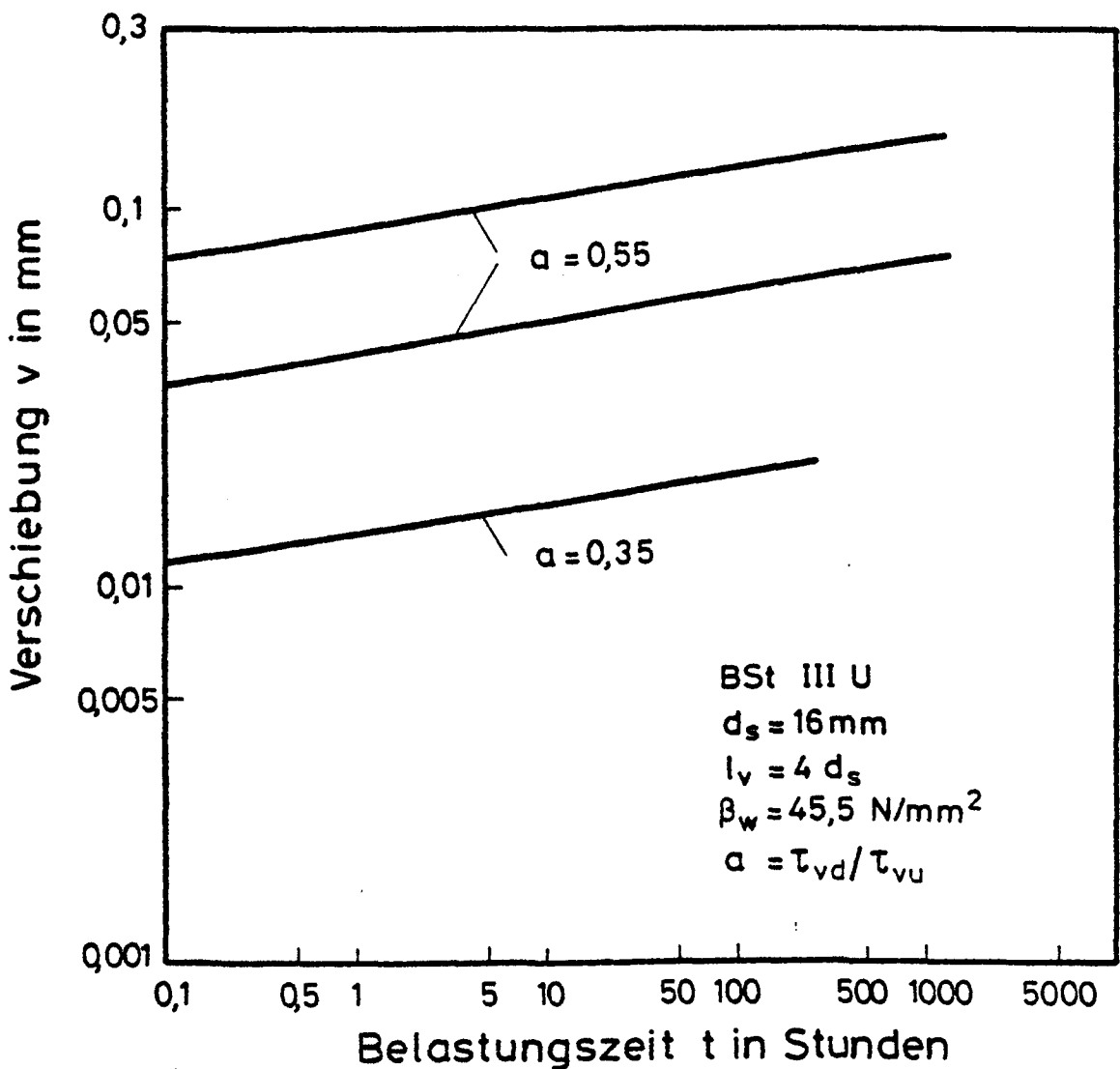


Bild 1.1: Zeitabhängige Verschiebung unter Dauerlast
nach Franke /1/

Die zeitabhängige Verformung unter Langzeitbeanspruchung kann somit unabhängig vom Belastungsgrad (bei $\tau_{vd} \leq 0,60 \tau_{vu}$) bzw. von der Anfangsverschiebung v_0 durch einen einheitlichen Kriechansatz beschrieben werden:

$$v(t) = v_0 + v_k(t) = v_0 [1 + \varphi_v(t)] \quad \text{mit} \quad \varphi_v(t) = \frac{v_k(t)}{v_0}.$$

Für die Kriechfunktion $\varphi_v(t)$ gelangte Franke unter Ausnutzung der Linearität der $v(t)$ -t-Verläufe bei doppel-logarithmischer Darstellung zu dem Ansatz:

$$\log v_1 = \log v_0 + a (\log t_1 - \log t_0).$$

In dieser Beziehung steht die Konstante a für die Steigung der Kriechkurve im doppel-logarithmischen Meßstab; t_1 ist ein beliebiger Zeitpunkt, an dem die Kriechverformung bestimmt werden soll. Den Zeitpunkt t_0 , ab dem die Linearität gilt und zu dem die Anfangsverschiebung v_0 gehört, setzte Franke zu $t_0 = 0,1$ h. Mit $t_1 = t_0 + t$ sowie

$$v_1 = v_0 [1 + \varphi_v(t)] \quad \text{folgt}$$
$$\varphi_v(t) = [(1 + 10 t)^a - 1].$$

Für die von Franke untersuchten Ausziehkörper aus Normalbeton ($\beta_w = 45 \text{ N/mm}^2$) gilt:

$$\varphi_v(t) = [(1 + 10 t)^{0,082} - 1] \quad t = \text{Belastungszeit in Stunden.}$$

Zu den experimentellen Untersuchungen von Franke ist anzumerken, daß die Standzeit der in sehr begrenzter Anzahl geprüften Ausziehkörper aus Normalbeton nur etwa einen Monat betrug, so daß eine Extrapolation der aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Kriechfunktion über größere Zeiträume problematisch ist. Parameterstudien fehlen gänzlich. Franke vermutet jedoch, daß z.B. das Belastungsalter oder die Betongüte die Verbundkriechmaße in ähnlicher Weise beeinflußt wie die Kriechmaße unbewehrten zentrisch gedrückten Betons.

Mit Hilfe des auf Basis seiner Versuchsergebnisse formulierten Verbundkriechgesetzes berechnete Franke die Auswirkungen des Verbundkriechens auf die Stahl- und Verbundspannungsverteilung sowie auf die zeitliche Verschiebungsentwicklung am Beispiel eines Stahlbetonkörpers mit beliebiger Verbundlänge. Zur Überprüfung seiner theoretischen Ergebnisse führte Franke Untersuchungen an Ausziehkörpern mit großer Verbundlänge durch und konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Versuch feststellen.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig beschäftigt sich bereits seit einigen Jahren mit Verbundkriechuntersuchungen. Die ersten Versuche wurden von Svensvik /2/ an Ausziehkörpern aus Normalbeton durchgeführt, bei denen vor allem die Belastungsgeschichte variiert wurde. Die Probekörper wurden im Alter von 28 Tagen belastet, die Standzeit betrug etwa 4 Monate. Die Versuchsergebnisse bestätigten die von Franke ermittelte Linearität der Verschiebungs-Zeit-Beziehung ab einer Belastungszeit von etwa $t = 1$ h. Auch die von Franke gefundene Parallelität der $v(t)$ - t -Verläufe bei unterschiedlich hohen Dauerlasten, d.h. Unabhängigkeit des Verbundkriechgesetzes von der Belastungshöhe, wurde von Svensvik's Ergebnissen bestätigt.

Zur Ableitung einer Kriechfunktion nutzte Svensvik die Tatsache, daß eine Gerade im doppel-logarithmischen Maßstab einer Parabel im doppellinearen Maßstab entspricht. Er erhielt damit die Kriechfunktion

$$\varphi_v(t) = n \cdot t^m.$$

Nachrechnungen von Versuchsergebnissen zeigten, daß das beobachtete Verhalten durch diesen Ansatz gut beschreibbar ist, wenn zur Berechnung der Faktoren m und n die Versuchswerte erst ab etwa 100 h berücksichtigt werden. Dann wird auch das im Versuch beobachtete Verhalten bei $t \leq 100$ h erfaßt.

1.2 Verbundkriechuntersuchungen unter nichtruhender Belastung

Zur Bestimmung des Verbundverhaltens von Stahlbetonbauteilen unter wiederholten Belastungen im Gebrauchsbereich führten Edwards und Yannopoulos /3/ Versuche an Ausziehkörpern ($d_s = 16$ mm, $l_v = 38$ mm) durch, die neun Lastspielen unterworfen und dann statisch bis zum Bruch gefahren wurden. Variable waren die Betondeckung ($\bar{u}_b = 2,5$ und $3,5$ mm) sowie die Oberspannung τ_v^0 , die zu $\tau_v^0 = 2,0; 3,9$ und $5,6$ N/mm² gewählt wurde.

Edwards und Yannopoulos stellten fest, daß sich die Form der τ_v -v-Schleife mit der Zyklenzahl deutlich ändert. Dabei kommt der Höhe der Oberspannung τ_v^0 eine größere Bedeutung zu als der Lastspielzahl: je höher die Oberspannung beim 1. Lastspiel, desto größer ist die Anfangsverschiebung und die Verschiebungszunahme bei nachfolgenden Lastspielen. Insbesondere bei Verbundspannungen unterhalb der Höchstspannung τ_v^0 ist mit steigender Lastspielzahl eine hohe Verschiebungszunahme zu verzeichnen (Bild 1.2). Aus der Darstellung in Bild 1.2 geht außerdem hervor, daß vor allem im 1. Lastspiel im Vergleich zu den weiteren Lastwechseln große Schlupfwerte gemessen werden. Charakteristisch für die Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung unter wiederholter Belastung ist das Hystereseverhalten als Ausdruck der Verbundzerstörung und der Rückschlupf nach Entlastung. In Bild 1.3 ist der Rückschlupf in Abhängigkeit von der Lastspielzahl dargestellt.

Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens unter Schwellbeanspruchung bei hoher Lastspielzahl wurden u.a. von Perry und Jundi /4/ sowie Rehm und Eligehausen /5/, /6/, /7/ durchgeführt.

Perry und Jundi /4/ untersuchten exzentrisch belastete Ausziehkörper ($d_s = 19$ mm, Verbundlänge $l_v = 12 d_s$), die zunächst 500 bis 1000 Lastwechsel (Frequenz $f = 0,083$ Hz) mit einer Oberlast von 56 % der im Kurzzeitversuch ermittelten Bruchlast unterworfen wurden. Wenn nach diesen Lastspielen die Stahlspannungsverteilung (Messung mit DMS in Stabinnennut) entlang der Verbundlänge keine

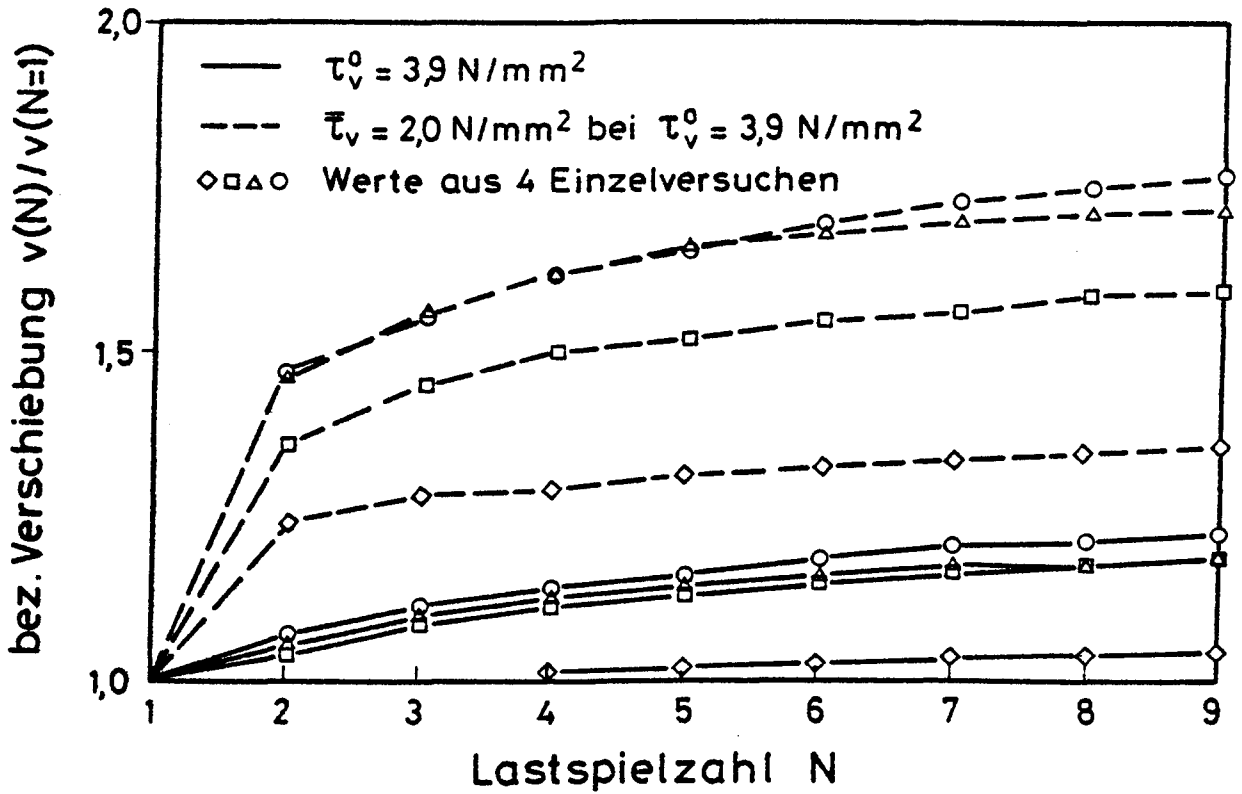


Bild 1.2: Verschiebungszunahme unter zyklischer Beanspruchung bei einer Oberspannung $\tau_v^0 = 3,9 \text{ N/mm}^2$ nach Edwards und Yannopoulos /3/

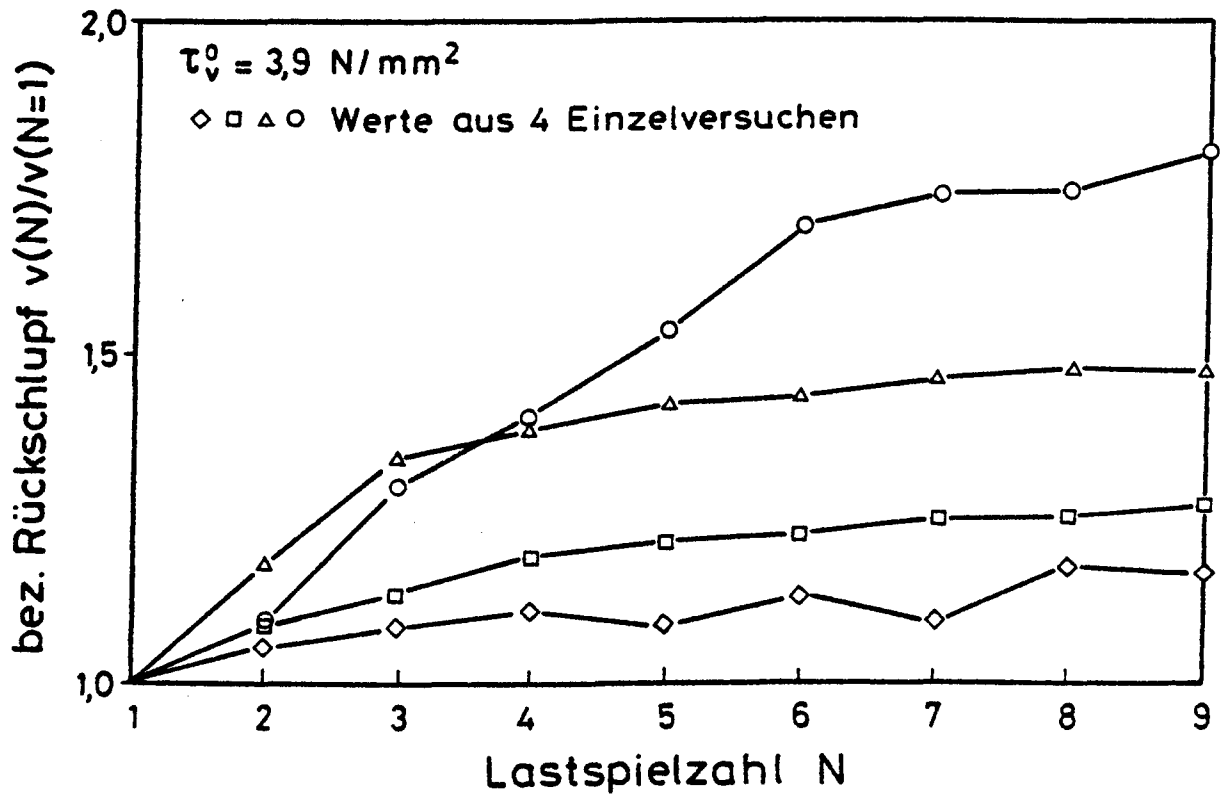


Bild 1.3: Rückschlupf nach Entlastung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl nach Edwards und Yannopoulos /3/

signifikante Änderung aufwies, wurde die Oberlast auf 80 % der Kurzzeitverbundbruchlast erhöht. Falls diese Last erreicht wurde, erfolgten weitere (max. 920) Lastspiele. Probekörper, die während der Schwellbelastung nicht versagten, wurden anschließend statisch bis zum Bruch belastet.

Die Versuche von Perry und Jundi ergaben, daß sich die Verbundspannungsspitze mit zunehmender Lastspielzahl vom belasteten zum unbelasteten Prüfkörperende verlagert. Diese Spannungsumlagerung scheint sich nach einigen hundert Lastspielen zu stabilisieren.

Rehm und Eligehausen führten umfangreiche Versuche an Ausziehkörpern durch, bei denen die Höhe der Oberlast, die Schwingbreite, der Stabdurchmesser, die Betongüte sowie die Verbundlänge variiert wurden. Da die Verfasser einen Zusammenhang zwischen der Verschiebungszunahme unter langzeitiger statischer und nichtruhender Beanspruchung vermuteten, führten sie parallel hierzu Dauerstandversuche (Belastungsdauer $t = 7 - 14$ Tage) durch. Die Ergebnisse der Zugschwellversuche zeigten, daß die bis zum Bruch ertragbare Lastwechselzahl von der Höhe der Oberspannung τ_v^0 und der Schwingbreite abhängt. In Bild 1.4 ist die Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit von der bezogenen Oberspannung τ_v^0 / τ_{vu} bei konstanter bez. Unterspannung τ_v^u aufgetragen. Wie aus der Darstellung ersichtlich, ist ein Einfluß der Betongüte und des Stabdurchmessers nicht erkennbar. Die Dauerfestigkeit des Verbundes ($N = 10^6$) unter Zugschwellbeanspruchung liegt für eine Unterspannung $\tau_v^u = 0,1 \tau_{vu}$ bei etwa $\tau_v^0 = 0,65 \tau_{vu}$.

Die Versuchsergebnisse zeigten, daß die Abhängigkeit der Verbundschwellfestigkeit von Mittelspannung und Schwingbreite wie für Stahl und Beton üblich in einem Dauerfestigkeitsschaubild aufgetragen werden kann.

Während der Lastspiele war eine starke Verschiebungszunahme am unbelasteten Stabende zu beobachten. Die Auftragung der Stabend-

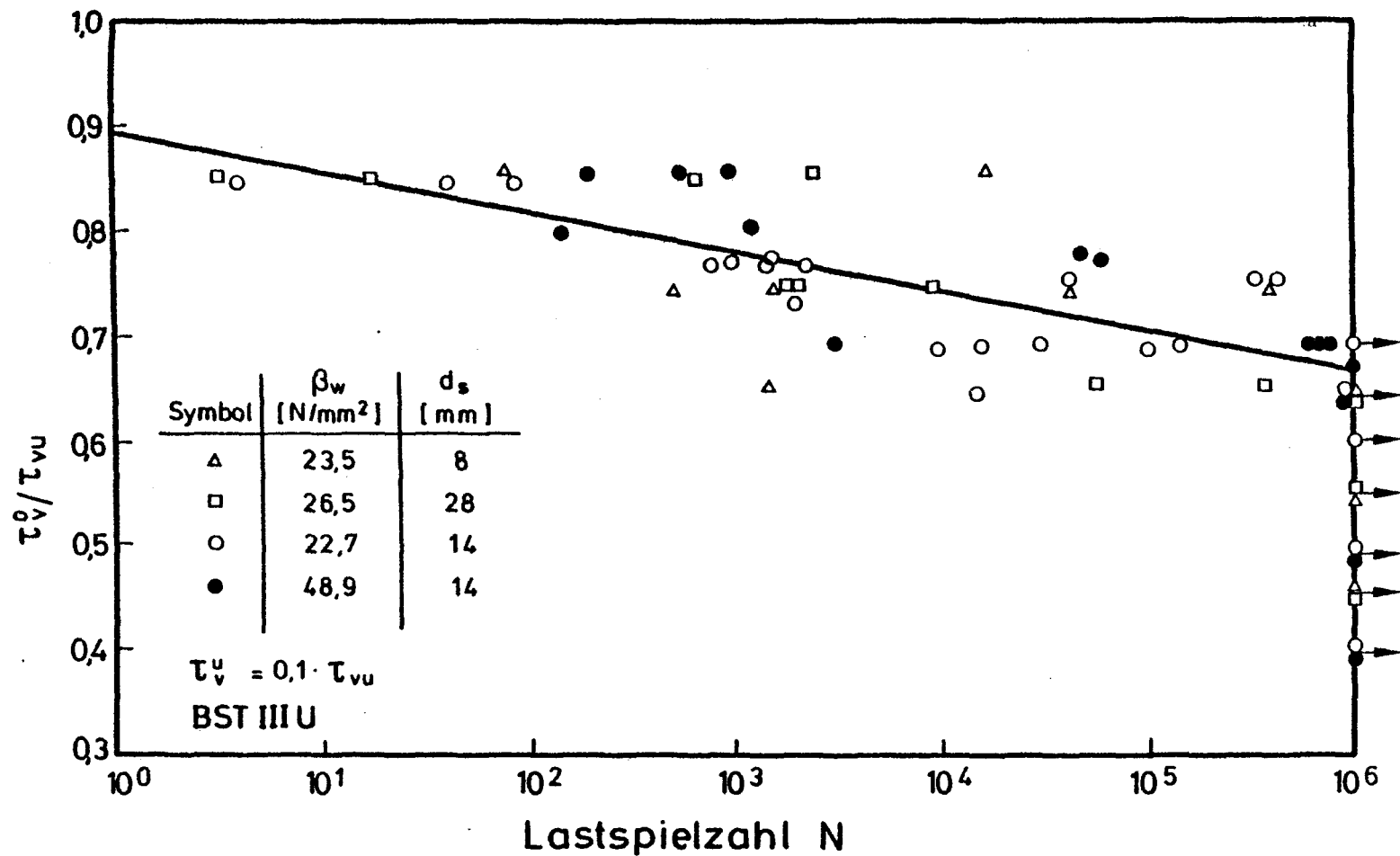


Bild 1.4: Einfluß der Oberspannung τ_y^0 (bezogen auf die Kurzzeitverbundfestigkeit τ_{vu}) bei konstanter Unterspannung τ_v^u auf die Lebensdauer nach Rehm und Elgehausen /6/

verschiebung über der Lastspielzahl im doppel-logarithmischen Maßstab ergab bei Belastungen unterhalb der Verbundschwellfestigkeit näherungsweise parallel zueinander verlaufende Geraden. Demgegenüber nahm die Steigung der Geraden bei Versuchen, die während der Lastwechsel versagten, deutlich zu, d.h. der Verbundbruch kündigte sich durch eine große Verschiebungszunahme weit vor Erreichen der Bruchlastspielzahl an (Bild 1.5).

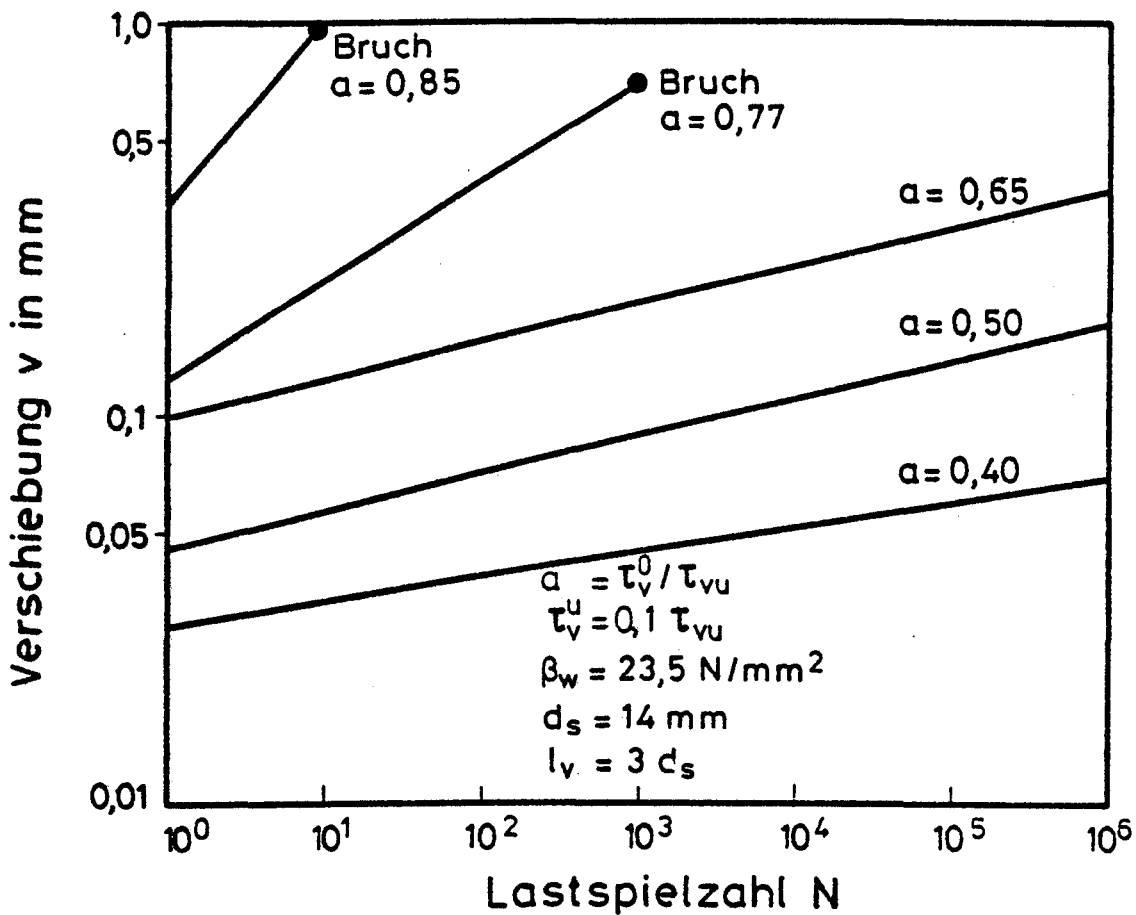


Bild 1.5: Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl und dem Belastungsgrad nach Rehm und Elgehausen /5/

Da Franke /1/ und Svensvik /2/ bei ihren Dauerstandversuchen bei gleicher Darstellungsweise eine vergleichbare zeitabhängige Zunahme der Stabendverschiebungen feststellten, kann angenommen

werden, daß das Verschiebungsverhalten unter einer langzeitigen statischen und einer dynamischen Beanspruchung miteinander korrespondiert. Analog zu der von Franke formulierten Kriechfunktion geben Rehm und Eligehausen einen von der Lastspielzahl N abhängigen Verschiebungsbeiwert an: $\varphi_V(N) = [(1 + N)^a - 1]$. Für die von Rehm und Eligehausen untersuchten Versuchsbedingungen betrug $a = 0,107$, während der von Franke an Ausziehkörpern mit vergleichbarer Verbundlänge ermittelte Kriechbeiwert

$\varphi_V(t) = [(1 + 10 t)^a - 1]$ eine etwas kleinere Hochzahl $a = 0,082$ aufweist. Nach Rehm und Eligehausen ergibt sich für $N = 10^6$ Lastwechsel der Verschiebungsbeiwert $\varphi_V(N)$ zu 3,4.

Gesetzmäßigkeiten, inwieweit die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter Dauerlast durch eine Zugschwellbelastung simuliert werden kann, sind aufgrund der von Rehm und Eligehausen bzw. Franke durchgeführten Dauerstandversuche, die zudem nur relativ geringe Standzeiten aufweisen, nicht schlüssig ableitbar. Außerdem fehlen Parameterstudien zum Einfluß der bezogenen Rippenfläche, der Frequenz, der Betongüte, der Unterlast etc. Rehm und Eligehausen /6/ schätzen jedoch, daß bei ihren Versuchsbedingungen die Verschiebungszunahme nach $N = 10^5$ Lastspielen mit $\tau_V^0 = \tau_{Vd}$ mit einer 2 bis 6 Monate währenden Dauerlast gleichzusetzen ist (Bild 1.6).

Ausziehkörper, die 10^6 Lastspiele überlebten, wurden anschließend statisch bis zum Bruch belastet. Die dabei ermittelten τ_V -v-Beziehungen verlaufen infolge der Vorwegnahme der Verschiebung durch die Schwellbelastung bis kurz vor Erreichen der Kurzzeitfestigkeit sehr steil, d.h. die vorherige Zugschwellbelastung wirkt sich "versteifend" auf das Verbundverhalten aus. Auf die Verbundfestigkeit hat eine vorausgehende Schwellbelastung keinen ungünstigen Einfluß (Bild 1.7).

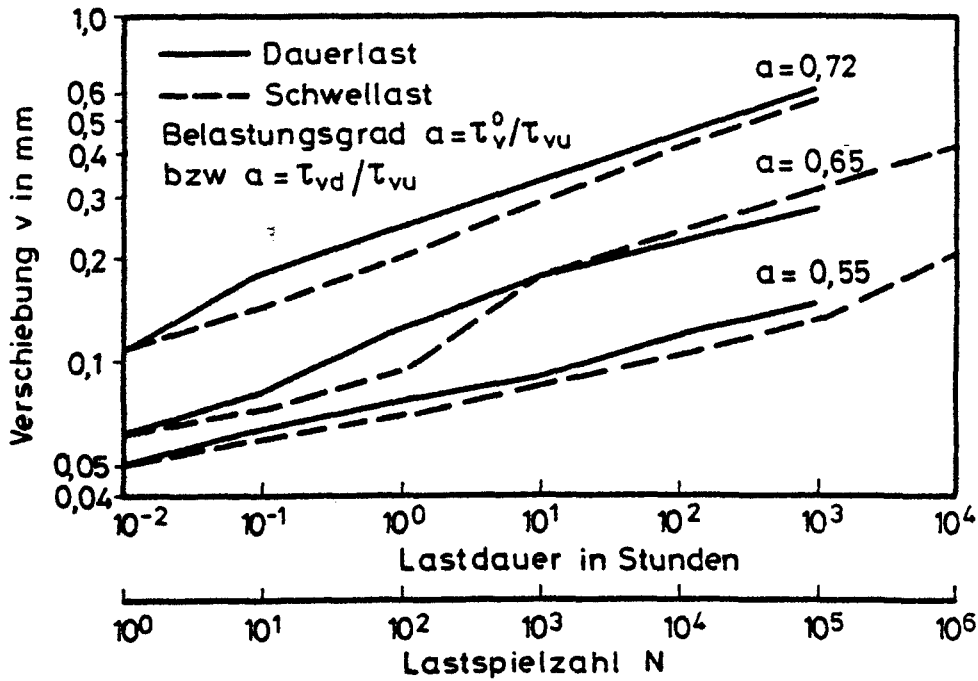


Bild 1.6: Vergleich der Verschiebungszunahme unter Schwelllast und unter Dauerstandlast nach Rehm und Eligehausen /5/

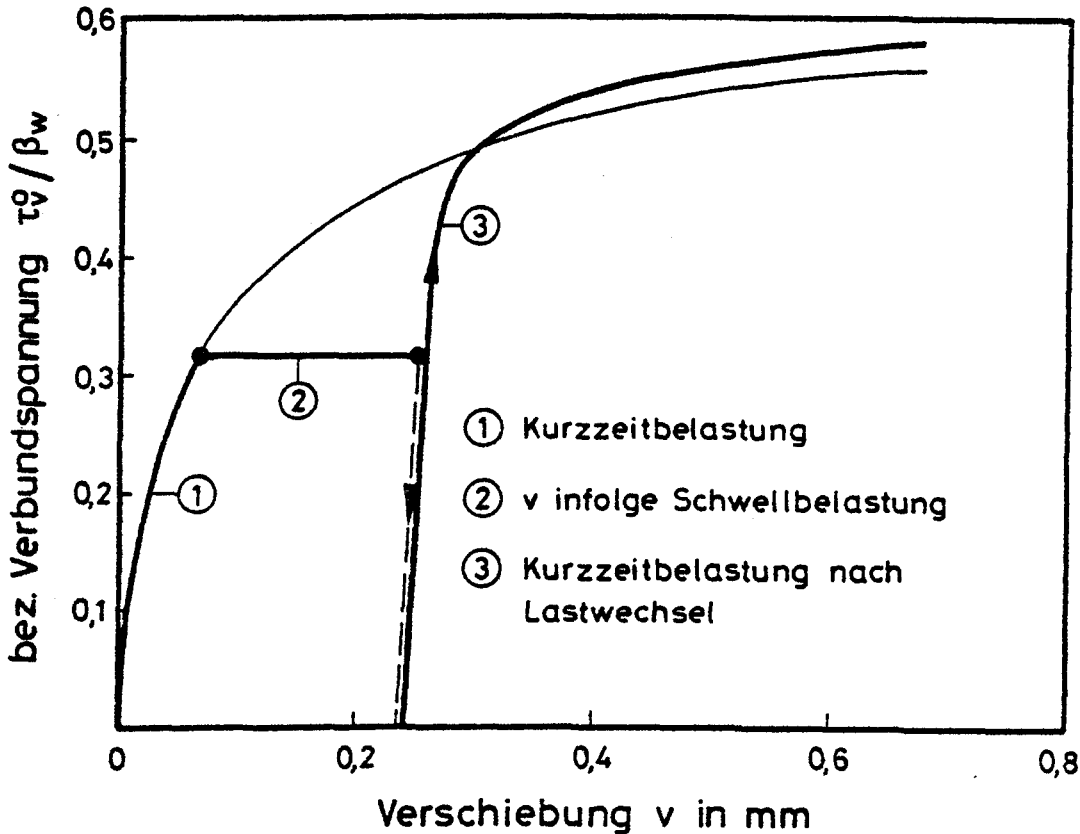


Bild 1.7: Schematische Darstellung von τ_v - v -Kurven unbelasteter bzw. durch eine Schwellbeanspruchung vorbelasteter Ausziehkörper nach Rehm und Eligehausen /5/

Die örtliche Verschiebungszunahme infolge der Schwellbelastung führt zu einer Spannungsumlagerung innerhalb der Verbundlänge. Die bereits von Perry und Jundi /4/ festgestellte Verlagerung der Verbundspannungsspitze vom belasteten zum unbelasteten Stabende mit zunehmender Lastspielzahl konnte durch Versuchsergebnisse von Rehm und Eligehausen an Ausziehkörpern mit langer Einbettungslänge (DMS in Stabinnennut) bestätigt werden. Im Gegensatz zur Annahme von Perry und Jundi, daß diese Spannungsumlagerung nach einigen hundert Lastwechseln abgeschlossen ist, konnten Rehm und Eligehausen bis zu $N = 10^6$ keine Stabilisierung feststellen.

2. Eigene Versuche

In dieser Arbeit wird das Verbundkriechen, d.h. die zeitabhängige bzw. die von der Lastspielzahl abhängige Verschiebungszunahme unter konstanter bzw. dynamischer Beanspruchung untersucht. Bei den Zugschwellversuchen wurden insbesondere die Frequenz und die Unterspannung variiert, da der Einfluß dieser Parameter in den bisherigen Untersuchungen nicht studiert worden war. Um die Verschiebungszunahme unter schwellender Beanspruchung mit der unter statischer Beanspruchung vergleichen zu können, wurden bei einigen Serien auch Dauerstandversuche durchgeführt. In Tabelle 2.1 ist das Versuchsprogramm zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Versuchsvariable bei den Dauerstand- und den Zugschwellversuchen

Lastniveau	$\tau_v^0 = 0,7/0,8/0,6 \quad v_u$ $\tau_v^0 = 0,1/0,25/0,4/0,2/0 \quad v_u$ $\tau_{vd} = 0,7 \tau_{vu}$
Frequenz	$f = 0,2/1/5 \text{ Hz}$
Betongüte	B25/B55
bez. Rippenfläche	$f_R = 0,065/0,082$
Belastungsalter	$t \geq 100 \text{ Tage}$

3. Ausbildung und Herstellung der Prüfkörper

Eine wirklichkeitsnahe experimentelle Verbunduntersuchung erfordert Prüfkörper, die die Spannungsverhältnisse im Bauteil gut nachbilden. Um den Beanspruchungszustand, in dem sich ein diskretes Stahlbetonelement im Bauteil befindet, zu erfassen, wurden zahlreiche Prüfkörper entwickelt: Ausziehkörper, Dehnkörper, Balkenendkörper, Balken etc. Zahlreiche Studien befassen sich mit den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Prüfarten /8/, /9/.

Obwohl der Ausziehkörper die Spannungszustände in der von Rissen durchsetzten Zugzone eines Stahlbetonbauteils unzureichend abbildet, wurde er für dieses Forschungsvorhaben gewählt. Trotz seiner unbestreitbaren Nachteile ist der Ausziehkörper aufgrund seines einfachen Aufbaus und der unkomplizierten Meßtechnik für Parameteruntersuchungen gut geeignet.

Die Abmessungen der verwendeten zylindrischen Ausziehkörper wurden in Anlehnung an die RILEM/CEB/FIP-Empfehlungen /10/ festgelegt:

Verbundlänge $l_v = 5 d_s$

verbundfreie Vorlänge $l = l_v = 5 d_s$

verbundfreie Nachlänge $l = 2 d_s$

Durchmesser des Probekörpers $D = 10 d_s$

Der Probekörper ist in Anlage 1 dargestellt.

Bei den Ausziehkörpern der Serie 6 aus hochwertigem Beton wurde die Verbundlänge auf $l_v = 3 d_s$ reduziert, um in den Versuchen die Streckgrenze bzw. die Dauerschwingfestigkeit des Stahles nicht zu erreichen. Zu Vergleichszwecken wurde auch bei den Probekörpern der Serie 4 die Verbundlänge auf $3 d_s$ begrenzt.

Die Versuchskörper wurden in Serien von 20 Proben je Betonage hergestellt. Als Schalung dienten in Längsrichtung aufgeschnittene Kunststoffrohre, die an Kopf und Fuß durch Stahlringe zusam-

mengehalten wurden. Eine Zentriereinrichtung ermöglichte eine unverschiebliche zentrische Halterung der Bewehrungsstäbe. Die Verdichtung erfolgte mit Innenrüttlern, wobei ein Berühren des Stahlstabes mit der Rüttelflasche vermieden wurde. Nach dem Betonieren wurden die Probekörper sieben Tage feucht gehalten, anschließend ausgeschalt und bis zum Versuchsbeginn in einem Klimaraum bei $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert.

Die Probekörper wurden stehend betoniert; die Belastungsrichtung entspricht der Betonierrichtung.

4. Baustoffe

4.1 Bewehrungsstahl

Die Versuche wurden mit handelsüblichem Betonrippenstahl BSt 420/500 RU, Durchmesser $d_s = 16\text{ mm}$, durchgeführt. Die verwendeten Stahlstäbe stammen aus zwei Walzungen. Die Festigkeits- und Profilierungskennwerte sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Bezogene Rippenfläche und Festigkeitskennwerte der verwendeten Bewehrungsstäbe

Stahlsorte	d_s mm	f_R --	β_S N/mm ²	β_Z N/mm ²
BSt 420/500 RU	16	0,082	490	710
		0,066	438	635

4.2 Beton

Das Versuchsprogramm sah die Untersuchung eines niederfesten und eines hochfesten Betons vor. Um die angestrebte niedrige Betonfestigkeit (B25) zu erreichen, war die Wahl eines hohen Wasserzementwertes unumgänglich. Die Sieblinie der Zuschlaggemische der

einzelnen Betonierserien entsprach etwa der Sieblinie B nach DIN 1045. Eine tabellarische Übersicht sämtlicher Kornzusammensetzungen und der zugehörigen Grenzsieblinien ist Anlage 2 zu entnehmen. Die Zusammensetzung der verwendeten Betone ist in Anlage 3 angegeben. Gleichzeitig mit den Versuchskörpern einer Betonierserie wurden Begleitkörper hergestellt und zusammen mit den Ausziehkörpern gelagert. Die an den Begleitkörpern ermittelten Betonfestigkeiten sind in Anlage 4 zusammengestellt.

5. Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

Die Kurzzeitversuche und die dynamischen Versuche wurden in einer vorhandenen Prüfvorrichtung durchgeführt. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Anlage 5 schematisch dargestellt.

Der Versuchsstand besteht aus Prüfraumen, Prüfzylinder und Kraftmeßdose. Der Ausziehkörper wird auf eine mit dem Stahlrahmen verschraubte Traverse aufgesetzt. Der Stahlstab wird durch eine Bohrung geführt und unten in einem "Stahlkäfig" durch Keilverankerung gehalten.

Zur Durchführung der Dauerstandversuche stand ein Prüfraumen zur Verfügung, in dem insgesamt 6 Probekörper unabhängig voneinander belastet und langfristig unter Last gehalten werden konnten. Die Prüfeinrichtung ist in Anlage 6 abgebildet. Der Versuchskörper wurde zum Ausgleich von Unebenheiten an der Probenunterseite auf eine Stahlplatte aufgegipst. Der Stahlstab wurde durch die Innenbohrung der zur Belastung verwendeten Lukas-Hohlkolbenzylinder geführt und durch Keilverankerung gehalten. Jeder Einzelprüfstand ist zur Konstanthaltung des Öldrucks bzw. zum Druckausgleich bei geringem Ölverlust mit einem Druckspeicher ausgestattet.

Um Nacherhärtungseinflüsse auszuschalten, begann die Prüfung der Versuchskörper i.d.R. in einem Alter von $t \geq 100$ Tage. Von jeder Betonierserie wurden zunächst mindestens 3 Kurzzeitversuche

durchgeführt. Aus den aufgebrachten Lasten wurden die Verbundspannungen unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung über die Verbundlänge berechnet:

$$\tau_v = \frac{F}{U_s \cdot l_v} \quad (5.1)$$

Die Höhe der Verbundkriechspannung τ_{vd} bei den Dauerstandversuchen bzw. der Oberspannung τ_v^o und der Unterspannung τ_v^u bei den Zugschwellversuchen wurde dann als Teil der im Kurzzeitversuch bestimmten mittleren Verbundbruchspannung τ_{vum} gewählt.

Die Verschiebungsmessung am unbelasteten Stabende erfolgte bei den Kurzzeitversuchen sowie bei den dynamischen Versuchen über induktive Wegaufnehmer, deren Taster auf den Enden der Stäbe aufsaßen. Während des Belastungsvorgangs wurden die Kraft und die Stabendverschiebung kontinuierlich mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa $\dot{F} = 17 \text{ kN/min}$. Bei den Zugschwellversuchen wurde i.d.R. zunächst die Oberlast angefahren. Nach Erreichen dieser Last wurde die Mittellast eingestellt. Die Probekörper wurden dann i.d.R. mit der vorgesehenen Spannungsamplitude und der Frequenz durch max. $N = 10^6$ Lastwechsel im Zugschwellbereich belastet. Die zyklische Spannungs-Zeit-Geschichte entsprach einer Sinusfunktion. Die Probekörper der Serien 1 und 2, die einer Frequenz von $f = 5 \text{ Hz}$ unterworfen wurden, wurden mit einer geringeren Frequenz von $f = 1 \text{ Hz}$ bzw. 2 Hz angefahren. Die Stabendverschiebung wurde bei den ersten Versuchen in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Zeittakt über einen angeschlossenen Spitzenwertschreiber ausgedruckt. Da sich bei den Versuchen mit der hohen Frequenz Schwierigkeiten ergaben, wurde bei allen weiteren Versuchen die Stabendverschiebung mit einem x-y-t-Schreiber aufgezeichnet.

Bei den Dauerstandversuchen wurde die Stabendverschiebung während des Belastungsvorganges mit induktiven Wegaufnehmern gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet. Nach Erreichen der vorgegebenen

Last wurde die Verschiebungsentwicklung während der ersten Stunden mit einem x-y-t-Schreiber aufgezeichnet. Die Wegaufnehmer wurden dann durch mechanische Feinmeßuhren mit einer Ablesegenauigkeit von 1/1000 mm ausgetauscht, die in größeren Zeitabständen abgelesen wurden. Nach einer Belastungszeit von etwa 2 - 3 Monaten (1500 bis 2200 h) wurden die Feinmeßuhren wieder durch induktive Wegaufnehmer ersetzt. Bei Entlastung der Proben konnte somit der spontan elastische sowie der verzögert elastische Rückschlupf kontinuierlich ermittelt werden.

Nach Beendigung der Dauerstand- bzw. Zugschwellversuche wurden alle Probekörper, die während der Versuche nicht versagt hatten, zur Ermittlung der Resttragkraft einer Kurzzeitbeanspruchung unterworfen. Anschließend wurde jeder Probekörper gespalten und auf Unregelmäßigkeiten im Verbundbereich (Lunker u.ä.) überprüft. Zusätzlich wurde die Verbundlänge nachgemessen.

6. Ergebnisse der Kurzzeitversuche

In der Anlage 7 sind die Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten Probekörper zusammengestellt. Die Tabellen enthalten für jeden Probekörper die nach Gleichung 5.1 berechneten Verbundspannungen für Stabendverschiebungen von $v = 0,01$ mm, $v = 0,1$ mm, $v = 0,5$ mm und $v = 1,0$ mm. Weiterhin ist die Verbundfestigkeit τ_{vu} und der dazugehörige Verschiebungswert angegeben. Aus der Tabelle sind auch die bezogenen Verbundfestigkeiten τ_{vu}/β_w zu entnehmen, wobei die Würfeldruckfestigkeit β_w bei Versuchsbeginn angesetzt wurde. In den Anlagen 8 bis 13 sind die in den Kurzzeitversuchen ermittelten τ_v - v -Beziehungen dargestellt.

Das Versagen der Probekörper erfolgte bei den niederfesten und hochfesten Betonen stets durch Stabauszug.

7. Ergebnisse der Versuche unter nicht ruhender Belastung

In den Anlagen 14 bis 19 sind die Ergebnisse der Zugschwellversuche tabellarisch zusammengestellt. In den Spalten 3 bis 5 der

Tabellen ist der auf den Mittelwert der Kurzzeitverbundfestigkeit der einzelnen Betonierserien bezogene Belastungsgrad für die Ober- und Unterlast sowie die Frequenz aufgeführt. Die Tabelle enthält weiterhin die beim erstmaligen Erreichen der Oberlast gemessenen Verschiebungswerte v_0 sowie die Verschiebungen unter Oberlast bei 10 bis 10^6 Lastwechseln (Spalten 6 bis 12). Bei einigen Probekörpern wurde zunächst die Mittellast angefahren. Die dabei gemessene Anfangsverschiebung v_0 ist in den Tabellen gekennzeichnet. In Spalte 13 ist die Bruchlastspielzahl und die Versagensart angegeben. Die Spalten 14 bis 16 kennzeichnen das Verhalten der vorbelasteten Probekörper bei statischer Belastung. Es sind die Verbundfestigkeiten, die auf die Betonfestigkeit bei Versuchsbeginn bezogenen Verbundfestigkeiten sowie das Verhältnis dieser Werte zu den entsprechenden mittleren Kurzzeitverbundfestigkeiten der unvorbelasteten Probekörper aufgeführt.

In den Anlagen 20 bis 46 sind die $v(N)$ - N -Beziehungen aufgetragen. Da nach Rehm und Eligehausen /5/ durch eine Darstellung der Versuchsergebnisse im doppel-logarithmischen Maßstab eine gute Anpassung an die Versuchsergebnisse erzielt wird, wurde diese Darstellungsweise auch hier gewählt.

Der von der Lastspielzahl bzw. von der Zeit unter Dauerlast abhängige Verschiebungsverlauf entspricht den bekannten Gesetzen des Betondruckkriechens (Bild 7.1).

Unter der Annahme der Übertragbarkeit der Kriechformel für das Betondruckkriechen auf das Verbundkriechen ergibt sich die Gesamtverschiebung unter Zugschwellbeanspruchung zu:

$$v_{\text{ges}}(N_1) = v_0(N_0) + v_k(N) = v_0(N_0) [1 + \varphi_v(N)] \quad (7.1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Beanspruchungen unterhalb der Dauerschwingfestigkeit des Verbundes liegen.

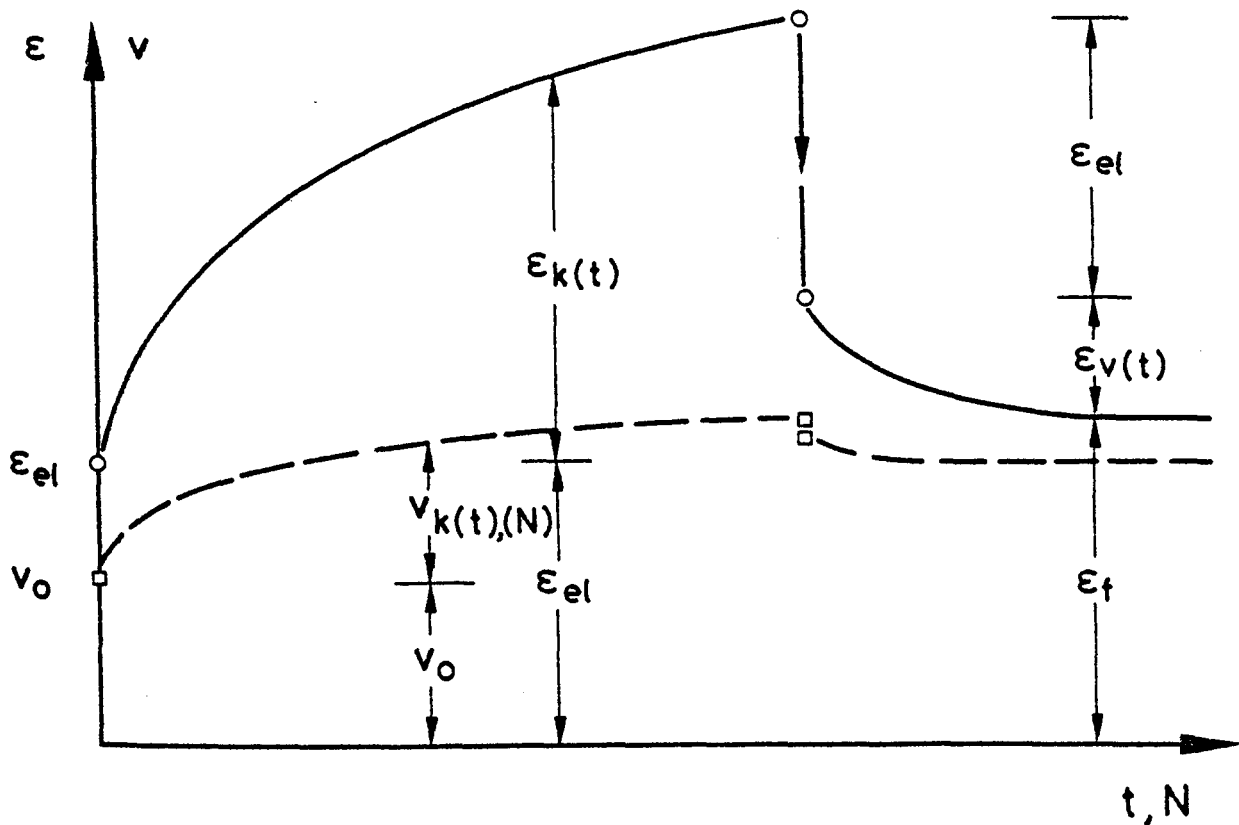


Bild 7.1: Schematische Darstellung des Betondruckkriechens und des Verbundkriechens infolge dynamischer bzw. statischer Dauerbeanspruchung

Die Verbundkriechzahl $\varphi_v(N)$ gibt das Verhältnis der Verschiebungszunahme infolge schwellender Beanspruchung zur lastabhängigen Verschiebung v_0 beim erstmaligen Erreichen der Oberspannung an:

$$\varphi_v(N_0, N_1) = \frac{v_{\text{ges}}(N_0, N_1) - v_0(N_0)}{v_0(N_0)} = \frac{v_{\text{ges}}(N_0, N_1)}{v_0(N_0)} - 1 \quad (7.2)$$

In den Anlagen 47 bis 73 sind die $\varphi_v(N)$ -N-Verläufe ebenfalls im doppel-logarithmischen Maßstab dargestellt. Sämtliche Darstellungen der Anlagen 14 bis 73 wurden mit Hilfe einer EDV-Anlage erstellt.

Die Gültigkeit von Gleichung 7.1 setzt voraus, daß die Kriechzahl $\Phi_V(N)$ von der Anfangsverschiebung $v_0(N_0)$ unabhängig ist. Da die $v(N)$ - N -Verläufe für Probekörper, die nicht zu Bruch gehen, im doppel-logarithmischen Maßstab für verschiedene Anfangsverschiebungen durch parallel zueinander verlaufende Geraden angenähert werden können, kann unabhängig von $v_0(N)$ dieselbe Kriechfunktion $\Phi_V(N)$ zur Berechnung der lastspielabhängigen Verschiebungen angesetzt und die Gültigkeit von Gleichung 7.1 angenommen werden.

Für den linearen Verlauf der $v(N)$ - N -Beziehung im doppel-logarithmischen Maßstab kann geschrieben werden:

$$\log v_{\text{ges}}(N_0, N_1) = \log v_0(N_0 = 1) + A (\log N_1 - \log N_0) \quad (7.3)$$

mit $N_0 = 1$

$$N_1 = N_0 + N = 1 + N$$

Gleichung 7.3 umgeschrieben, ergibt:

$$\log \frac{v_{\text{ges}}(N_0, N_1)}{v_0(N_0)} = \log \left(\frac{N_1}{N_0} \right)^A \quad (7.4)$$

bzw.

$$\frac{v_{\text{ges}}(N_0, N_1)}{v_0(N_0)} = \left(\frac{N_1}{N_0} \right)^A \quad (7.5)$$

Mit $N_1 = N_0 + 1$ und Gleichung 7.2

$$\Phi_V(N) = \Phi_V(N_0, N_1) = \frac{v_{\text{ges}}(N_0, N_1)}{v_0(N_0)} - 1$$

erhält man:

$$\Phi_V(N) = (1 + N)^A - 1 \quad (7.6)$$

Gleichung 7.6 kann für $N \gg 1$ auch vereinfacht zu

$$\Phi_V(N) = N^A - 1 \quad (7.7)$$

gesetzt werden.

Die Kriechfunktion $\varphi_v(N)$ kann u.a. eine Funktion der Unterspannung, der Frequenz, der bezogenen Rippenfläche und der Betonfestigkeit sein. Der Einfluß der genannten Parameter wird in den folgenden Abschnitten anhand der Versuchsergebnisse diskutiert.

7.1 Einfluß der Unterspannung

Bei den Zugschwelluntersuchungen wurde bei konstanter Oberspannung τ_v^0 die Unterspannung τ_v^0 und damit die Spannungsamplitude τ_a variiert.

In den Anlagen 74 und 75 ist für die gewählten Oberspannungen $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$ sowie $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ die Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit von der bezogenen Schwingbreite aufgetragen. Aus der Darstellung geht hervor, daß die Lebensdauer mit Reduzierung der Unterspannung herabgesetzt wird.

Für eine Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ ist in den Anlagen 76 und 77 der Einfluß der Unterspannung für ausgewählte Probekörper dargestellt. Die Versuchsergebnisse können für $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ (d.h. $2 \tau_a = 0,3$) in der gewählten logarithmischen Darstellungsweise gut durch eine Gerade angenähert werden. Auch für eine Unterspannung von $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ kann der $v(N)$ -N-Verlauf näherungsweise durch eine Geradengleichung angegeben werden. Eine Verringerung der Unterspannung auf $\tau_v^u = 0,1 \tau_{vu}$ führt zu einer Reduzierung der Lebensdauer. Die $v(N)$ -N-Beziehungen zeigen im doppel-logarithmischen Maßstab einen von der Geraden abweichenden progressiven Verlauf.

Bei einer Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$ und einer Unterspannung $\tau_v^u = 0,2 \tau_{vu}$ (d.h. $2 \tau_a = 0,6$) treten Dauerbrüche auf.

Für die Verhältnisse $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,5 \tau_{vu}$ sind bei einer Frequenz von $f = 1$ Hz für die Serie 4 Verbundbrüche, für die Serie 6 "Durchläufer" zu verzeichnen. Alle Probekörper der Serien 4 und 6, die mit 5 Hz gefahren wurden, erreichen eine Lastspielzahl von $N = 10^6$.

Die Versuchsergebnisse für die Probekörper der Serien 4 und 6, die mit $\tau_v^0 = 0,6 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0$ belastet wurden, widersprechen sich. Während bei der Serie 4 Proben, die mit 5 Hz gefahren wurden, Verbundbrüche aufweisen, erreichen die Proben der Serie 6 die vorgegebene Grenzlastspielzahl $N = 10^6$. Die Steigung der $v(N)$ -Werte bei hoher Lastspielzahl deutet jedoch auf ein Versagen bei $N > 10^6$ hin. Die Proben der Serien 4, die mit 1 Hz gefahren wurden, überstehen die dynamische Beanspruchung, während bei den Proben der Serie 6 Verbund- bzw. Stahlversagen auftritt. Die Steigung der $v(N)$ -Werte bei den Proben der Serie 4 deutet jedoch auch hier auf ein Versagen bei $N > 10^6$ hin. Das Erreichen der Grenzlastspielzahl $N = 10^6$ bei den Proben der Serien 4 und 6 kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, daß die $v_0(N)$ -Werte bei diesen Prüfkörpern relativ niedrig waren. Ob die unterschiedliche Betongüte einen Einfluß ausübt, kann anhand der Versuchsergebnisse nicht abgeschätzt werden (siehe auch Abschnitt 7.3).

Der Einfluß der Unterspannung auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung kann aus Bild 7.2 abgelesen werden.

In Bild 7.2 sind die mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelten Steigungen A der im doppel-logarithmischen Maßstab linearen $v(N)$ - N -Verläufe für $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ über der bezogenen Unterspannung aufgetragen. Vergleicht man die gemittelten A -Faktoren, so ist mit steigender Unterspannung eine deutliche Abnahme der Steigung der $v(N)$ - N -Kurven zu verzeichnen.

Für Beton unter Druckschwellbeanspruchung gilt die bei bestimmter Mittelspannung $N = 2 \cdot 10^6$ mal ertragene Schwingbreite als Dauerschwingfestigkeit. Für die in dieser Untersuchung gewählten Spannungsverhältnisse τ_v^0, τ_v^u kann die Zeitschwingfestigkeit des Verbundes für $N = 10^6$ folgendermaßen eingegrenzt werden:

Für eine Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ liegt die Schwingbreite $2 \tau_a$ für $N = 10^6$ bei $0,45 \tau_{vu}$. Aus dem Verlauf der $v(N)$ - N -Linien zeichnet sich jedoch für $N > 10^6$ ein Verbundversagen ab.

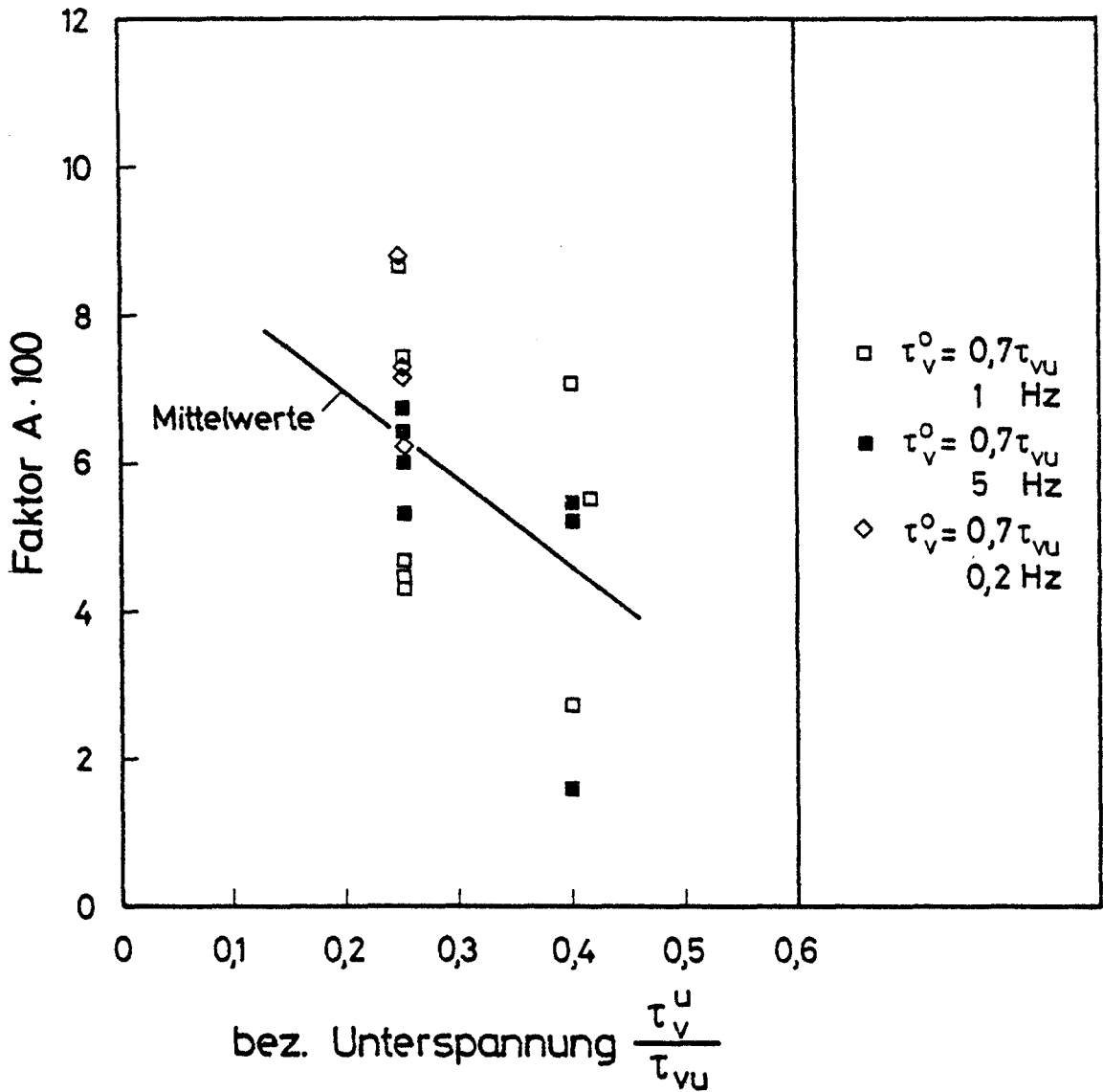


Bild 7.2: Einfluß der Unterspannung auf die Steigung A der v(N)-N-Verläufe

Für die Schwingbreite $2 \tau_a = 0,30 \tau_{vu}$ (für $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$) sind auch für $N > 10^6$ keine Verbundbrüche zu erwarten, d.h. für eine Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ dürfte gelten: $0,45 \tau_{vu} > 2 \tau_a > 0,3 \tau_{vu}$.

Die Zugschwellfestigkeit des Verbundes (d.h. $\tau_v^u = 0$) ist niedriger als die untersuchte Schwingbreite $2 \tau_a = 0,6 \tau_{vu}$.

Eine Oberspannung von $\tau_V^0 = 0,8 \tau_{VU}$ liegt nach den ersten bereits durchgeführten Versuchen zur Eingrenzung der Verbunddauerstandfestigkeit oberhalb dieses Grenzwertes.

Bei einer Schwingbreite von $2 \tau_a = 0,30 \tau_{VU}$ (für $\tau_V^0 = 0,8 \tau_{VU}$, $\tau_V^u = 0,5 \tau_{VU}$) treten teilweise Verbundbrüche auf, d.h. wahrscheinlich ist $2 \tau_A < 0,30 \tau_{VU}$.

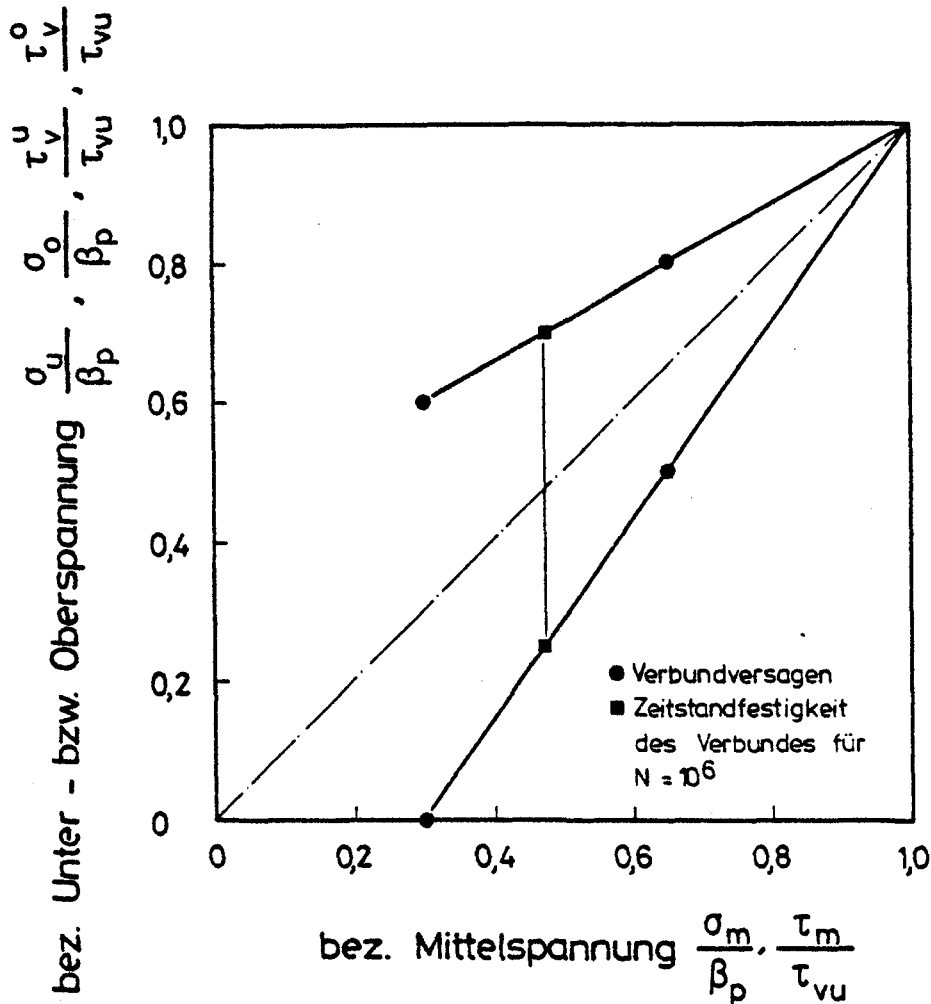


Bild 7.3: Vergleich von Ergebnissen der Verbundschwelluntersuchungen mit dem Smith-Diagramm für Beton unter Druckschwellbeanspruchung

Bild 7.3 zeigt das Smith-Diagramm für Beton unter Druckschwellbeanspruchung aus Gaede /11/ für $N = 2 \cdot 10^6$. In das Diagramm ist für $N=10^6$ die Zeitschwingfestigkeit des Verbundes $\tau_{vD} = \pm 0.225 \tau_{vu}$ für $\tau_m = 0,475 \tau_{vu}$ eingetragen. Die eingezeichneten schwarzen Punkte markieren keine Zeitschwingfestigkeiten, sondern Spannungsverhältnisse, die zu Verbundbrüchen führen. Man erkennt, daß die Dauerschwingfestigkeit des Verbundes etwas unterhalb der des Betons liegen dürfte.

7.2 Einfluß der Frequenz

Der Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung wurde bislang nicht untersucht. Alle Versuche von Rehm und Eligehausen wurden mit einer Frequenz von $f = 1$ Hz durchgeführt.

Auch bei den bisherigen Untersuchungen des Betonkriechens unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung wurde der Einfluß der Frequenz wenig erforscht. Alda /12/ geht bei seiner theoretischen Betrachtung des Schwingkriechens von Beton davon aus, daß sich die Schwingkriechdehnungen unter Ansatz eines Schwingkriechfaktors aus den Kriechdehnungen infolge einer konstant einwirkenden Dauerspannung $\hat{=}$ der Mittelspannung ableiten lassen. Dieser Schwingkriechfaktor η ist u.a. abhängig von der Frequenz. Je kleiner die Frequenz f ist, desto höher ist der Faktor η und damit die Schwingkriechdehnung. Diese Annahme gilt für den von Alda untersuchten Frequenzbereich $f < 10^{-1}$ Hz und insbesondere für rechteckige Spannungszeitfunktionen.

In den Anlagen 78 und 79 ist der Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung für einige ausgewählte Probekörper zusammengestellt. Aus den Versuchsergebnissen der Serie 1 läßt sich für Spannungen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,1 \tau_{vu}$ ein Einfluß der Frequenz ableiten. Probekörper, die mit niedriger Frequenz $f = 1$ Hz gefahren wurden, versagten bei einer geringeren Lastspielzahl als Probekörper, die mit hoher

Frequenz geprüft wurden. Diese Aussage kann durch die Versuchsergebnisse der Serie 3 nicht bestätigt werden. Hier treten bei den Probekörpern, die mit $f = 5$ Hz belastet wurden, bei niedrigeren Lastspielzahlen Verbundbrüche auf.

Für die Spannungsverhältnisse $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{VU}$ und $\tau_V^U = 0,4 \tau_{VU}$ sind für die Betonierserien 1 und 3 die Steigungen der $v(N)$ - N -Verläufe über der Frequenz in Bild 7.4 aufgetragen. Vergleicht man die gemittelten A-Faktoren, so ist mit zunehmender Frequenz eine Abnahme der Steigung der Verschiebungskurven zu verzeichnen.

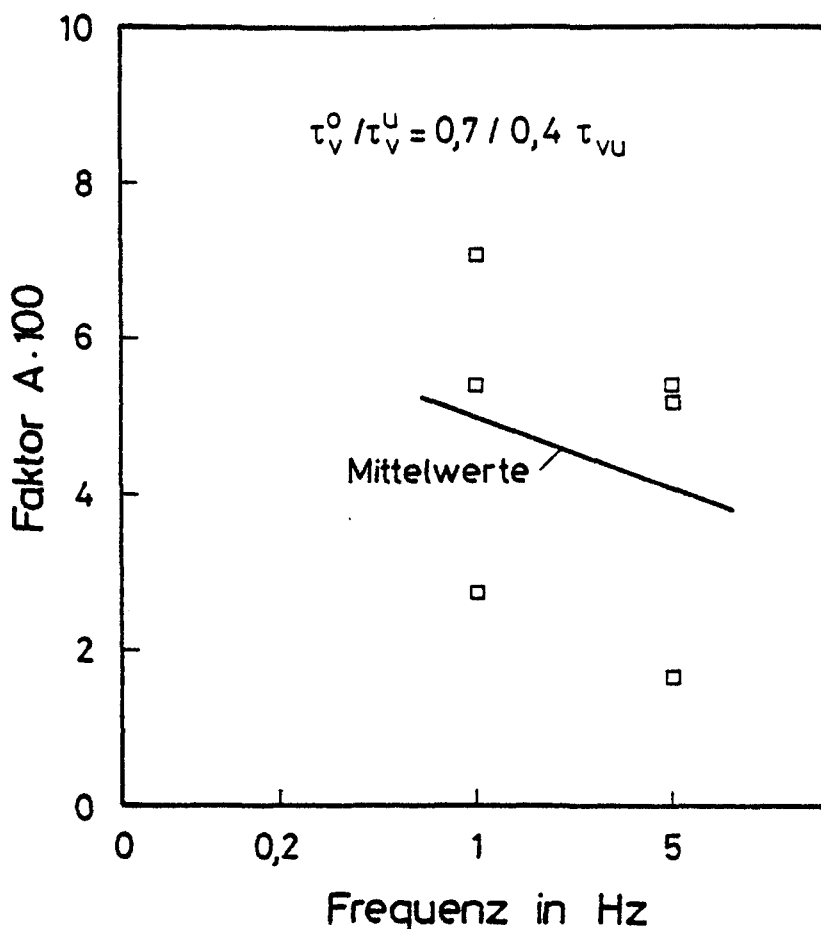


Bild 7.4: Einfluß der Frequenz auf die Steigung A der $v(N)$ - N -Verläufe

Für die Spannungsverhältnisse $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ ist die Abhängigkeit der Steigerung von der Frequenz nicht eindeutig ablesbar (Bild 7.5).

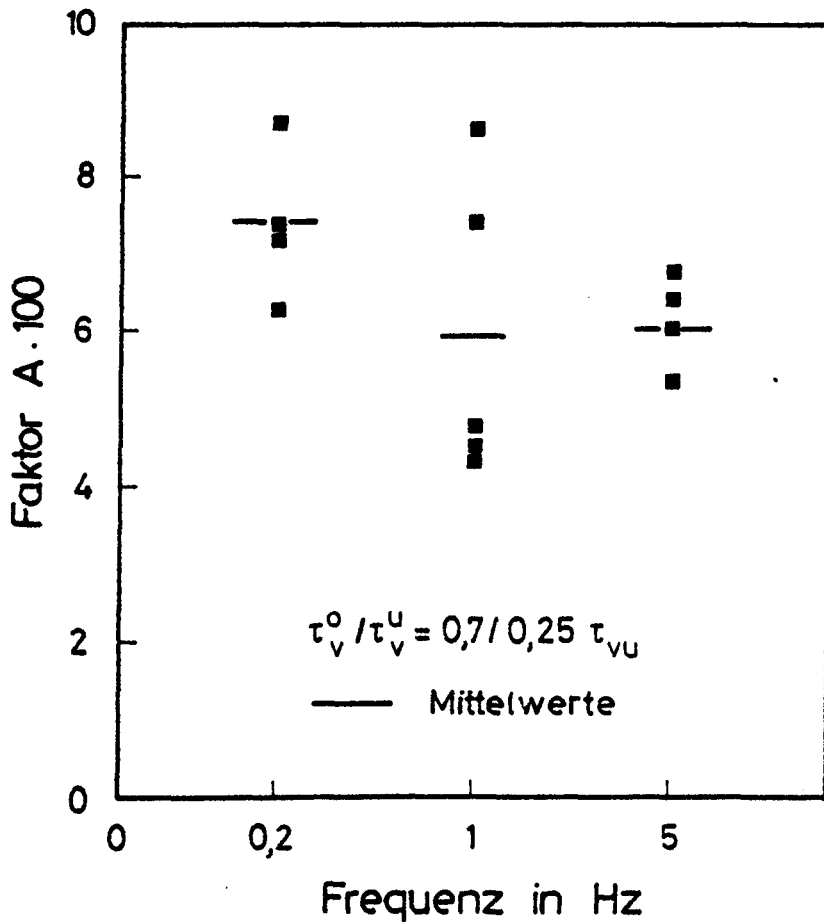


Bild 7.5: Einfluß der Frequenz auf die Steigung A der $v(N)$ -N-Verläufe

Eine Unterspannung von $\tau_v^u = 0,2 \tau_{vu}$ führt bei einer Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$ stets zum Verbundversagen. Eine Erhöhung der Unterspannung auf $\tau_v^u = 0,5 \tau_{vu}$ ergibt bei Serie 4 für $f = 1$ Hz Verbundbrüche, für $f = 5$ Hz "Durchläufer". Die Steigung A der $v(N)$ -N-Verläufe für $f = 5$ Hz liegt im Mittel bei $A = 0,03518$. Bei Serie 6 wurde für beide Frequenzen $f = 1$ Hz und $f = 5$ Hz die

Grenzlastspielzahl $N = 10^6$ erreicht. Die Steigung A der $v(N)$ - N -Linien variierte nur geringfügig ($A = 0,07686$ für $f = 5$ Hz, $A = 0,07085$ für $A = 1$ Hz). Für die Spannungsverhältnisse $\tau_V^0 = 0,6 \tau_{Vu}$ und $\tau_V^u = 0$ widersprechen sich die Versuchsergebnisse. Während die Proben der Serie 4, die mit $f = 5$ Hz gefahren wurden, Verbundbrüche aufwiesen, erreichten die Probekörper der Serie 6 die vorgegebene Grenzlastspielzahl $N = 10^6$. Bei einer Frequenz von $f = 1$ Hz sind bei Serie 4 "Durchläufer" zu verzeichnen, während bei den Proben der Serie 6 Verbund- bzw. Stahlversagen auftrat.

7.3 Einfluß der bezogenen Rippenfläche

Die lastabhängige Verschiebung v_0 hängt unmittelbar von der bezogenen Rippenfläche f_R ab. Mit steigender Rippenfläche f_R wird die Verschiebung v_0 geringer, da die Beanspruchung der Betonkonsolen zwischen den Rippen bei hohen f_R -Werten absinkt. Damit ergibt sich auch ein Zusammenhang zwischen der zu bestimmten Verschiebungen gehörenden Verbundspannung τ_V und der bezogenen Rippenfläche. Aus Kurzzeit-Ausziehversuchen leiten Martin und Noackowski /13/ eine lineare Beziehung zwischen der auf die Betonfestigkeit bezogenen Verbundspannung und der bezogenen Rippenfläche f_R ab:

$$\frac{\tau_V(v)}{\beta_w} = f(v) \cdot f_R \quad (7.8)$$

Bereits durchgeführte Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerlast, über deren Ergebnisse in /14/ berichtet wurde, ergaben, daß die zeitabhängige Verschiebungszunahme mit steigender bezogener Rippenfläche geringer wird.

Ein Vergleich der Anfangsverschiebungen v_0 der Serien 2 und 3 (siehe Anlagen 15 und 16) zeigt, daß die v_0 -Werte bei Serie 2 ($f_R = 0,065$) etwas höher sind als bei Serie 3 ($f_R = 0,082$). Bei diesem Vergleich muß beachtet werden, daß bei der Serie 2 i.d.R. die Mittelspannung angefahren wurde.

Trägt man für die Spannungen $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_V^u = 0,25 \tau_{vu}$ die Steigungen A über der bezogenen Rippenfläche f_R auf (siehe Bild 7.6), so zeichnet sich ein deutlicher Einfluß von f_R ab. Die $v(N)$ -N-Linien verlaufen mit steigender bezogener Rippenfläche f_R flacher.

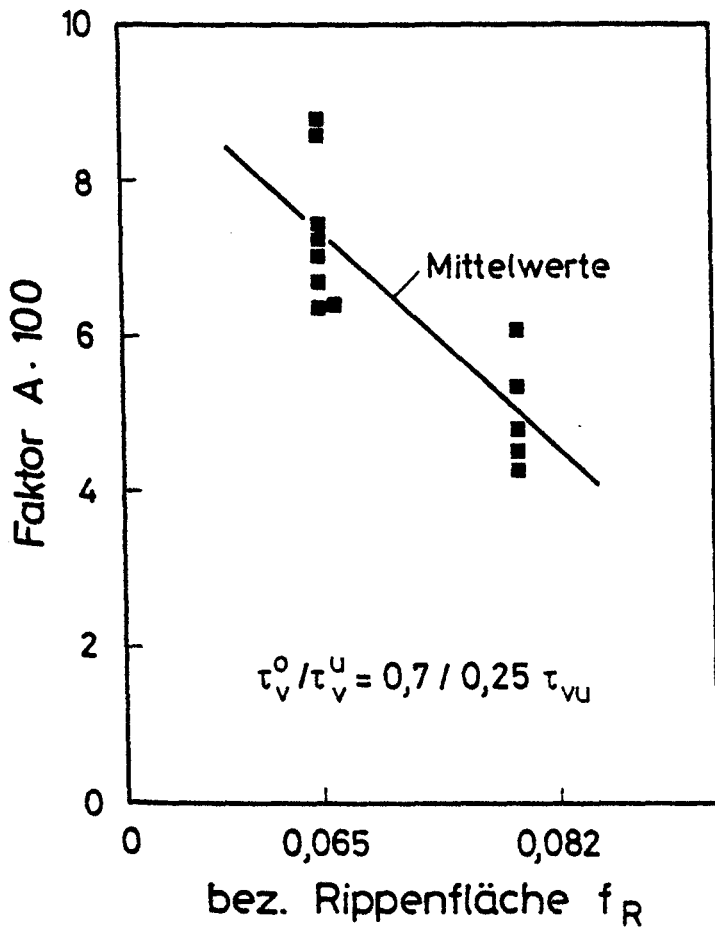


Bild 7.6: Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Steigung A der $v(N)$ -N-Verläufe

Ein Vergleich der mit den Versuchsergebnissen berechneten $\varphi_V(N)$ -Werte ergibt für die Serie 2 ($f_R = 0,065$) maximale Werte von $\varphi_V(N) \cong 2,0$ gegenüber $\varphi_V(N) = 1,4$ für die Serie 3 ($f_R = 0,082$). In den Anlagen 80 und 81 ist der Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf den $v(N)$ -N-Verlauf sowie die $\varphi_V(N)$ -Werte für ausgewählte Probekörper dargestellt.

Um den Einfluß der bezogenen Rippenfläche festzustellen, können auch die Versuchsergebnisse der Serien 4 und 6 herangezogen werden. Für die Spannungen $\tau_V^0 = 0,8 \tau_{Vu}$ und $\tau_V^u = 0,5 \tau_{Vu}$ weisen die $v(N)$ - N -Kurven der Serie 4 ($f_R = 0,082$) eine wesentlich geringere Steigung auf als die der Serie 6 ($f_R = 0,065$). Die maximalen $\varphi_V(N)$ -Werte liegen für die Probekörper der Serie 6 über denen der Serie 4.

7.3 Einfluß der Betongüte

Aus Kurzzeitversuchen ist bekannt, daß für Betonrippenstähle ein linearer Zusammenhang zwischen der Verbundspannung τ_V und der Betondruckfestigkeit β_w vorausgesetzt werden kann.

Verbunduntersuchungen unter konstanter Dauerlast /14/ ergaben keinen nennenswerten Einfluß der Betondruckfestigkeit auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme. Die von Rehm und Eligehausen /5/ durchgeführten Zugschwellversuche ließen ebenfalls keinen Einfluß der Betongüte auf das Verschiebungsverhalten unter zyklischer Beanspruchung erkennen.

Um den Einfluß der Betonfestigkeit bei den hier beschriebenen Zugschwelluntersuchungen abzuschätzen, müßten die Versuchsergebnisse der Serien 4 und 6 verglichen werden. Da bei diesen Versuchsserien jedoch die bezogene Rippenfläche f_R variierte, werden etwaige Einflüsse aus der Betongüte durch den Einfluß des Parameters f_R überdeckt, so daß der Einfluß der Betongüte hier nicht zuverlässig bestimmt werden kann.

7.5 Einfluß des Belastungsalters

In der Regel wurden die Zugschwellversuche zu einem Zeitpunkt T_0 begonnen, bei dem Einflüsse aus der Festigkeitsentwicklung ausgeschlossen waren. Um den Einfluß des Belastungsalters tastweise zu erfassen, wurden die 3 Probekörper der Serie 5 in einem Alter von $T_0 = 13$ Tagen geprüft.

Unter der Voraussetzung, daß die Betonfestigkeit keinen Einfluß auf die $v(N)$ - N -Verläufe hat, lassen sich die Versuchsergebnisse der Serie 5 mit denen der Serie 2 vergleichen.

Die Messung der Anfangsverschiebung v_0 ergab für den jüngeren Beton etwas geringere Werte (vgl. Anlagen 15 und 18). Die $v(N)$ - N -Kurven verlaufen für den jüngeren Beton flacher als für den älteren Beton (s. Anl. 82). Die Kriechzahlen $\varphi_v(N)$ liegen für den jüngeren Beton ebenfalls leicht niedriger als für den älteren Beton (s. Anl. 83). Die vorliegenden Ergebnisse widersprechen damit teilweise den in /14/ beschriebenen Untersuchungen zum Verbundverhalten unter konstanter Dauerlast.

Da die Erforschung der Rißbildung von insbesondere massigen Bauteilen infolge Zwang- und Eigenspannungen aus Temperatur- und Schwindvorgängen in jungem Betonalter für die Praxis von großer Bedeutung ist, muß u.E. auch dem Verbundverhalten in jungem Alter Aufmerksamkeit gewidmet werden. Wir meinen daher, daß zum Verbundverhalten unter dynamischer und statischer Langzeitbeanspruchung in jungem Belastungsalter weitere Versuche durchgeführt werden sollten.

7.6 Verhalten der Probekörper bei statischer Belastung nach Lastwechsel

Alle Probekörper, die die Zugschwellbeanspruchung überstanden, wurden anschließend statisch bis zum Bruch belastet. Die τ_v - v -Beziehungen dieser vorbelasteten Proben sind auszugsweise in den Anlagen 84 und 85 zusammengestellt.

In Bild 7.7 sind die τ_v - v -Beziehungen vorbelasteter Proben beispielhaft aufgetragen.

Aus der Darstellung geht hervor, daß der τ_v - v -Verlauf der vorbelasteten Versuchskörper durch einen steilen Anstieg gekennzeichnet ist. Bei einer Stabendverschiebung von z.B. $v = 0,1$ mm werden

Verbundspannungen erreicht, die etwa das Zweifache unvorbelasteter Proben betragen. Erst kurz vor Erreichen der Verbundfestigkeit treten deutliche Verschiebungen auf. Die Verschiebungszunahme infolge Zugschwellbelastung ist somit fast rein plastischer Natur.

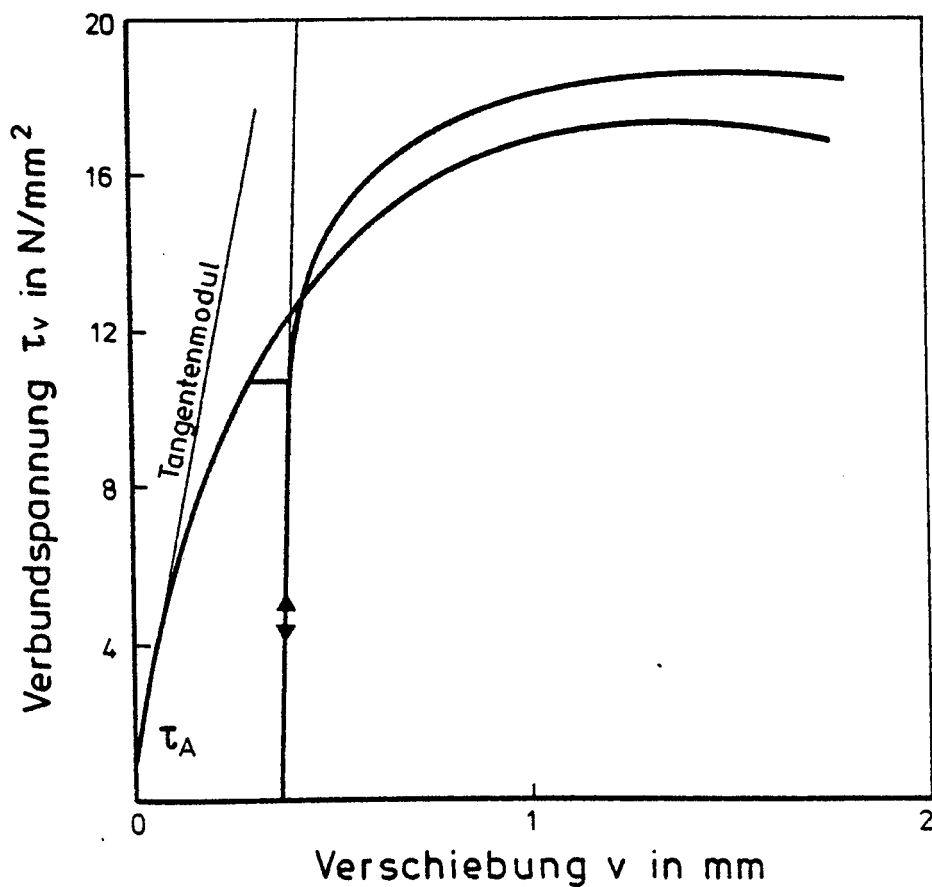


Bild 7.7: Schematische Darstellung der τ_v - v -Beziehung der vorbelasteten Probekörper

In Anlage 86 ist der "Elastizitätsmodul des Verbundes" E_V für die unvorbelasteten und die vorbelasteten Probekörper zusammengestellt. Aus den τ_V - v -Verläufen wurde der " E_V -Modul" für die unvorbelasteten Probekörper als Tangentenmodul an den Punkt τ_A und für die vorbelasteten Probekörper als Ursprungsmodul bestimmt.

Der " E_V -Modul" der jungfräulichen Proben liegt für den niederfesten Beton zwischen 30,2 und 55,3 N/mm³ und für den hochfesten Beton zwischen 67,4 und 90,1 N/mm³. Der " E_V -Modul" der vorbelasteten Proben ist um eine 10er-Potenz höher. Bei gleicher Oberspannung nimmt der " E_V -Modul" mit zunehmender Schwingbreite leicht ab. Ein signifikanter Einfluß der weiteren Parameter ist nicht erkennbar. Auffällig ist der hohe " E_V -Modul" der bereits in jungem Alter belasteten Proben der Serie 5 mit dem hochfesten Beton.

Ein Vergleich der Verbundfestigkeiten vorbelasteter und unvorbelasteter Versuchskörper (s. Anl. 13 bis 18) läßt einen ungünstigen Einfluß einer Schwellbelastung nicht erkennen. Die Verbundfestigkeiten der einer schwellenden Beanspruchung unterworfenen Proben lagen, unabhängig von Oberspannung, Schwingbreite und Frequenz, bei etwa 90 bis 135 % der in den Kurzzeitversuchen ermittelten mittleren Verbundfestigkeit τ_{vum} (s. Anl. 87).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß eine Zugschwellbelastung unterhalb der Dauerschwingfestigkeit des Verbundes gegenüber einer konstanten Laststeigerung im Kurzzeitversuch keinen vermin-dernden Einfluß auf die Verbundbruchspannung ausübt.

8. Ergebnisse der Dauerstandversuche

Um die Verschiebungsentwicklung bei ruhender und nichtruhender Belastung vergleichend beurteilen zu können, wurden 2 bzw. 3 Probekörper der Serien 1 bzw. 2, 4 und 6 einer statischen Dauerbeanspruchung unterworfen. Die Belastungshöhe wurde zu $\tau_{vd} = 0,70 \tau_{vu}$ gewählt und entsprach damit der Oberspannung bei

den Zugschwellversuchen der Serien 1, 2 und 3. In der Anlage 88 sind die Verschiebungen $v(T)$ tabellarisch zusammengestellt. In den Anlagen 89 bis 96 sind die $v(T)$ - T - bzw. $\varphi_v(T)$ - T -Verläufe der Einzelversuche in doppel-logarithmischem Maßstab aufgetragen.

Unter der Annahme der Linearität der $v(T)$ - T -Kurven im doppel-logarithmischen Maßstab ergibt sich entsprechend Gleichung 7.3

$$\log v_{\text{ges}}(T_0, T_1) = \log v_0(T_0) + A (\log T_1 - \log T_0) \quad (8.1)$$

mit T_0 = Belastungsbeginn

T = Belastungsdauer

$$T_1 = T_0 + T$$

Gleichung (8.1) umgeformt ergibt

$$\frac{v_{\text{ges}}(T_0, T_1)}{v_0(T_0)} = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^A \quad (8.2)$$

$$\text{Mit } T_1 = T_0 + T \text{ und } \varphi_v(T) = \frac{v_{\text{ges}}(T_0, T_1)}{v(T_0)} - 1$$

erhält man:

$$\varphi_v(T) = \left(1 + \frac{T}{T_0} \right)^A - 1 \quad (8.3)$$

Setzt man den Zeitpunkt T_0 , ab dem die Linearität gilt, zu $T_0 = 0,1$ h (wie Franke /1/), so erhält man für die Steigung A der $v(T)$ - T -Verläufe die in Tabelle 8.1 zusammengestellten Werte. Für $T_0 = 0,01$ h ergeben sich die in Tabelle 8.2 aufgeführten Steigungen.

Tabelle 8.1: Steigung A der $v(T)$ - T -Verläufe im doppel-logarithmischen Maßstab für $T_0 = 0,1$ h

	Serie 1	Serie 2	Serie 4	Serie 6
A · 100	7,675	6,437	5,521	8,021
	6,556	5,802	4,511	8,599
		6,777	4,520	8,567
Mittel	7,115	6,339	4,851	8,396

Tabelle 8.2: Steigung A der $v(T)$ - T -Verläufe im doppel-logarithmischen Maßstab für $T_0 = 0,01$ h

	Serie 1	Serie 2	Serie 4	Serie 6
A · 100	7,332	5,883	4,141	7,641
	6,173	5,374	4,026	8,469
		6,121	3,149	8,499
Mittel	6,753	5,793	3,772	8,203

Ein Vergleich der aus den Versuchsergebnissen berechneten $\varphi_V(T)$ -Werte mit den nach Gleichung 8.3 ermittelten Kriechzahlen ist in Anlage 97 dargestellt.

Mit dem Ansatz $T_0 = 0,01$ h, d.h.

$$\varphi_V(T) = (1 + 100 T)^A - 1 \quad (T \text{ in Stunden}) \quad (8.4)$$

erhält man eine gute Annäherung an die Versuchswerte. Die mit Gleichung 8.4 berechneten Kriechzahlen liegen für kleine Belastungszeiten oberhalb der tatsächlichen Werte.

Setzt man dagegen $T_0 = 0,1 \text{ h}$, d.h.

$$\varphi_V(T) = (1 + 10 T)^A - 1 \quad (T \text{ in Stunden}) \quad (8.5)$$

so erhält man stets zu kleine $\varphi_V(T)$ -Zahlen.

Nur wenn die Zunahme der $v(T)$ -Werte für Belastungszeiten $T < 1 \text{ h}$ sehr klein ist (z.B. bei Serie 2) paßt sich die nach Glg. 8.5 berechnete $\varphi_V(T)$ -Kurve für lange Belastungszeiten gut an den tatsächlichen Verlauf an (s. Anl. 98).

8.1 Verhalten der Probekörper bei statischer Belastung nach konstanter Dauerbelastung

Nach Beendigung der Dauerstandbelastung wurde bei jedem Probekörper während bzw. nach der Entlastung der spontan elastische sowie der verzögert elastische Rückschlupf gemessen. Es zeigte sich, daß insbesondere der verzögert elastische Rückschlupf sehr gering ist; bereits nach 2 Tagen ist die Rückverformung abgeschlossen (siehe auch Bild 7.1). Auf die Anfangsverschiebung v_0 bezogen, beträgt der spontan elastische Rückschlupf bis zu 10 %, der verzögert elastische Anteil liegt unter 3 %.

Nach Abschluß der Dauerstandversuche wurden die Probekörper einer Kurzzeitbeanspruchung unterworfen. Die τ_V - v -Beziehungen der vorbelasteten Proben verlaufen im Vergleich zu an jungfräulichen Proben gewonnenen τ_V - v -Linien sehr steil. Ein Vergleich der Verbundfestigkeiten (s. Anl. 99) ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen vorbelasteten und unvorbelasteten Proben. Eine vorhergehende Dauerstandbelastung übt damit ebenso wie eine Zugschwellbelastung (s. Abschn. 7.6) gegenüber einer konstanten Laststeigerung im Kurzzeitversuch keinen ungünstigen Einfluß auf die Verbundbruchspannung aus.

9. Vergleich des Verbundkriechverhaltens unter Zugschwellbeanspruchung und unter konstanter Dauerlast

Da für die Dauerstand- und Zugschwellversuche bei gleicher Darstellungsweise eine vergleichbare Verschiebungszunahme festzustellen ist, kann angenommen werden, daß das Verschiebungsverhalten unter einer langzeitigen statischen und einer dynamischen Beanspruchung miteinander korrespondiert. Gesetzmäßigkeiten, inwieweit die zeitabhängige Verschiebungszunahme durch eine Zugschwellbeanspruchung simuliert werden kann, existieren nicht.

In seiner Arbeit über das Schwingkriechen von Beton gibt Alda /12/ einen Schwingkriechfaktor η an, der das Verhältnis von Schwingkriechdehnung zu Kriechdehnung infolge stationären Kriechens mit σ_m darstellt. Der Schwingkriechfaktor η kann > 1 werden, wenn u.a.

- die Belastungsdauer klein ist
- zu einem frühen Zeitpunkt T_0 belastet wird
- die Frequenz klein ist (hier $f < 10^{-5}$ Hz)
- die Spannungsamplitude groß ist und
- die Mittelspannung niedrig ist.

Um das Verschiebungsverhalten unter Dauer- und Zugschwellbeanspruchung vergleichend beurteilen zu können, sind in Tabelle 9.1 die mittleren Steigungen A der $v(T)$ - T - bzw. $v(N)$ - N -Verläufe aufgeführt.

In Anlage 100 ist für die Serie 1 der $v(T)$ - T -Verlauf mit dem $v(N)$ - N -Verlauf für die Spannungsverhältnisse $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ aufgetragen. Die Anlage 101 enthält die Verschiebungsverläufe für die Dauerstandversuche und die Zugschwellversuche mit $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ der Serie 2.

Tabelle 9.1: Mittlere Steigungen der v(T)-T- und v(N)-N-Verläufe

Serie Versuchsart		τ_v^0/τ_{vu} τ_v^u/τ_{vu} τ_{vd}/τ_{vu}	Frequenz Hz	100 · A	$\eta = \frac{100 \cdot A \text{ (LW)}}{100 \cdot A \text{ (D)}}$
1	LW	0,7/0,4	5	5,343	0,79
	LW	0,7/0,4	1	6,247	0,93
	D	0,7	-	6,753	-
2	LW	0,7/0,25	0,2	7,378	1,27
	LW	0,7/0,25	1	8,032	1,39
	LW	0,7/0,25	5	6,581	1,14
	D	0,7	-	5,793	-
3	LW	0,7/0,4	5	1,616	-
	LW	0,7/0,4	1	2,789	-
	LW	0,7/0,25	5	5,701	-
	LW	0,7/0,25	1	4,595	-
4	LW	0,8/0,5	5	3,518	0,67
	D	0,7	-	5,275	-
6	LW	0,8/0,5	5	7,686	0,94
	LW	0,8/0,5	1	7,085	0,86
	D	0,7	-	8,203	-

Aus der Anlage 100 ist ersichtlich, daß der v(T)-T-Verlauf gut mit dem v(N)-N-Verlauf für $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$; $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$, 1 Hz übereinstimmt. Unter Ansatz der in Tabelle 9.1 aufgeführten Steigungen ergeben sich mit den Gleichungen 7.6 und 8.4 die gleichen $\varphi_v(t)$, (N)-Werte für $N = 10^6$ und $T = 3550$ h. Das heißt, eine Zugschwellbelastung mit $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ und $f = 1$ Hz entspricht für $N = 10^6$ Lastwechsel einer Dauerstandbelastung mit $\tau_{vd} = 0,7 \tau_{vu}$ über einen Zeitraum von etwa 5 Monaten. Ein Zugschwellversuch ($N = 10^6$ mit $f = 1$ Hz = 11,5 Tagen) kann damit als Zeitraffer für eine Dauerstandbeanspruchung angesehen werden.

Für gleiche Spannungsverhältnisse τ_v^0/τ_v^u ergeben sich bei $f = 5$ Hz im Vergleich zu einer Dauerstandbelastung mit $\tau_v^0 = \tau_{vd} = 0,7 \tau_{vu}$ kleinere φ_v -Werte.

Aus Anlage 100 geht hervor, daß die $v(N)$ -N-Linien für größere Schwingbreiten $2 \tau_a = 0,45 \tau_{vu}$ steiler verlaufen als die $v(T)$ -T-Kurve mit $\tau_{vd} \triangleq \tau_v^0$.

10. Zusammenfassung

Das Verbundverhalten unter Zugschwellbeanspruchung wurde an einfachen zylindrischen Ausziehkörpern mit zentrisch einbetoniertem Bewehrungsstab studiert. Bei diesen Versuchen wurde bei konstanter Oberspannung τ_v^0 die Unterspannung τ_v^u und damit die Schwingbreite, die Frequenz, die Betongüte, die Einbettungslänge sowie das Belastungsalter variiert. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Höhe der Unterspannung hat bei konstanter Oberspannung einen starken Einfluß auf die Lebensdauer sowie auf den Verlauf der $v(N)$ -N-Kurven. Die bis zum Versagen ertragbare Lastspielzahl nimmt bei konstanter Oberspannung mit sinkender Unterspannung ab.
2. Die Auftragung der Versuchsergebnisse in einem Dauerfestigkeitsschaubild zeigt, daß die Dauerschwingfestigkeiten des Verbundes unter Schwellbeanspruchung etwas kleiner als die für unbewehrten Beton ist.
3. Der Einfluß der Frequenz ist mit den hier vorliegenden Versuchsergebnissen nicht eindeutig feststellbar. Es scheint jedoch bei niedriger Frequenz eine größere Zunahme der Verschiebungen $v(N)$ vorzuliegen als bei hoher Frequenz. In der Regel versagen Probekörper, die mit niedriger Frequenz gefahren werden, bei einer geringeren Lastspielzahl als Probekörper, die mit hoher Frequenz belastet werden. Eine zyklische Belastung mit $f = 1$ Hz mit $N_{\max} = 10^6$ Lastwechseln entspricht einer Belastungsdauer von

$t \cong 11,5$ Tagen, bei einer Frequenz von $f = 5$ Hz dauert ein Versuch demgegenüber $t = 2,3$ Tage. Da bei einer zyklischen Belastung mit niedriger Frequenz zeitabhängige Einflüsse die Verschiebungszunahme infolge Lastwechsel überlagern, ist auch theoretisch bei niedriger Frequenz eine größere Zunahme der Verschiebungen zu erwarten als bei hoher Frequenz.

4. Wie bei Kurzzeitversuchen ist auch bei Dauerschwingversuchen ein deutlicher Einfluß der Profilierung, ausgedrückt durch die bezogene Rippenfläche f_R , feststellbar. Die lastabhängige Anfangsverschiebung v_0 sowie die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung ist für Bewehrungsstähle mit niedriger bezogener Rippenfläche größer als für Bewehrungsstäbe mit hohem f_R -Wert.

5. Ein Einfluß der Betongüte ist aus den hier vorliegenden Versuchsergebnissen nicht ableitbar. Untersuchungen von Rehm und Eligehausen /5/ bzw. Verbundkriechversuche unter konstanter Dauerlast ergaben keinen Einfluß der Betonfestigkeit auf den Verschiebungsverlauf $v(N)$ bzw. $v(t)$.

6. Zugschwellversuche mit jungem Beton ergaben gegenüber Dauerstandversuchen widersprüchliche Ergebnisse. Um dies aufzuklären, sind weitere Untersuchungen notwendig.

7. Die vorbelasteten Probekörper erreichen bei statischer Kurzzeitprüfung Verbundfestigkeiten, die bei etwa 90 bis 135 % der mittleren Verbundfestigkeiten der jungfräulichen Proben liegen.

8. Ein Vergleich des "Elastizitätsmoduls des Verbundes" E_V ergibt für die vorbelasteten Probekörper einen etwa 10mal so hohen E_V -Modul wie für die unvorbelasteten Proben.

9. Für Probekörper, die mit einer Oberspannung unterhalb der Dauerfestigkeit des Verbundes ($\tau_V^0 < 0,7 \tau_{VU}$) belastet wurden, verlaufen die $v(N)$ - N -Linien für Schwingbreiten zwischen 0,45 und 0,3 τ_{VU} im doppel-logarithmischen Maßstab näherungsweise linear. Die Kriechfunktion $\varphi_V(N)$ ergibt sich zu

$$\varphi_V(N) = (1 + N)^A - 1$$

bzw. für $N \gg 1$ zu

$$\varphi_V(N) = N^A - 1.$$

Die mittlere Steigung A ist in Abhängigkeit von den untersuchten Parametern in nachstehender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 10.1: Faktor A in Abhängigkeit von den Versuchsparametern für $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{VU}$

$\frac{\tau_V^0}{\tau_{VU}}$ $\frac{\tau_V^u}{\tau_{VU}}$	f_R	A für $f = 0,2 \text{ Hz}$	A für $f = 1 \text{ Hz}$	A für $f = 5 \text{ Hz}$
0,7/0,4	0,082	-	0,051	0,041
0,7/0,25	0,082	-	0,046	0,057
0,7/0,25	0,065	0,074	0,080	0,066

Rehm und Eligehausen /5/ erhalten für ihre Versuchsergebnisse einen Faktor A von 0,107. Für $N = 10^6$ läßt sich die Kriechzahl $\varphi_V(N)$ damit zu 3,4 berechnen. Mit den hier vorliegenden Versuchsergebnissen berechnen sich die $\max \varphi_V(N)$ -Werte zu 2,02; sie liegen damit deutlich unter den von Rehm und Eligehausen ermittelten Kriechzahlen.

Um den Einfluß einer Zugschwell- bzw. Dauerbeanspruchung auf die Verschiebungszunahme vergleichend beurteilen zu können, wurden zusätzlich bei einigen Versuchsserien Dauerstandversuche mit $\tau_{Vd} = 0,7 \tau_{VU} = \tau_V^0$ der Serien 1, 2 und 3 durchgeführt. Für die

gewählte Dauerspannung verlaufen die $v(T)$ - T -Linien im doppel-logarithmischen Maßstab näherungsweise linear. Analog zu der Kriechfunktion $\varphi_V(N)$ (Glg. 7.6) läßt sich eine Kriechfunktion $\varphi_V(T)$ formulieren. Die Auswertungen der Versuchsergebnisse ergaben, daß durch die Beziehung

$$\varphi_V(T) = (1 + 100 T)^A - 1 \quad (T \text{ in Stunden})$$

die beste Anpassung an die Versuchswerte gelingt. Die ermittelten A -Faktoren sind bereits in Tabelle 8.2 zusammengestellt.

Der Vergleich der Verschiebungszunahme unter Zugschwell- und unter Dauerbeanspruchung zeigt für die Spannungsverhältnisse $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{VU}$, $\tau_V^u = 0,4 \tau_{VU}$, $f = 1 \text{ Hz}$ sowie $\tau_{Vd} = \tau_V^0 = 0,7 \tau_{VU}$ einen annähernd gleichen Verlauf. Eine Zugschwellbelastung kann daher als Zeitraffer für eine Dauerstandbeanspruchung angesetzt werden. Für die vorstehend genannten Spannungsverhältnisse entsprechen $N = 10^6$ Lastwechsel einer Belastungsdauer von etwa $T = 5$ Monaten.

Man kann analog zu Alda /12/ einen Schwingkriechfaktor η definieren, der das Verhältnis von Schwingkriechdehnung zu stationärer Kriechdehnung angibt. Setzt man diesen Faktor η für $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{VU}$, $\tau_V^u = 0,4 \tau_{VU}$, $f = 1 \text{ Hz}$, $N = 10^6$ und $\tau_{Vd} = \tau_V^0$, $T = 3550 \text{ h}$ zu 1,0, ergeben sich Schwingkriechfaktoren $\eta > 1$, wenn

- die Unterspannung verringert wird,
- die Belastungsdauer verringert wird.

Schwingkriechfaktoren $\eta < 1$ erhält man

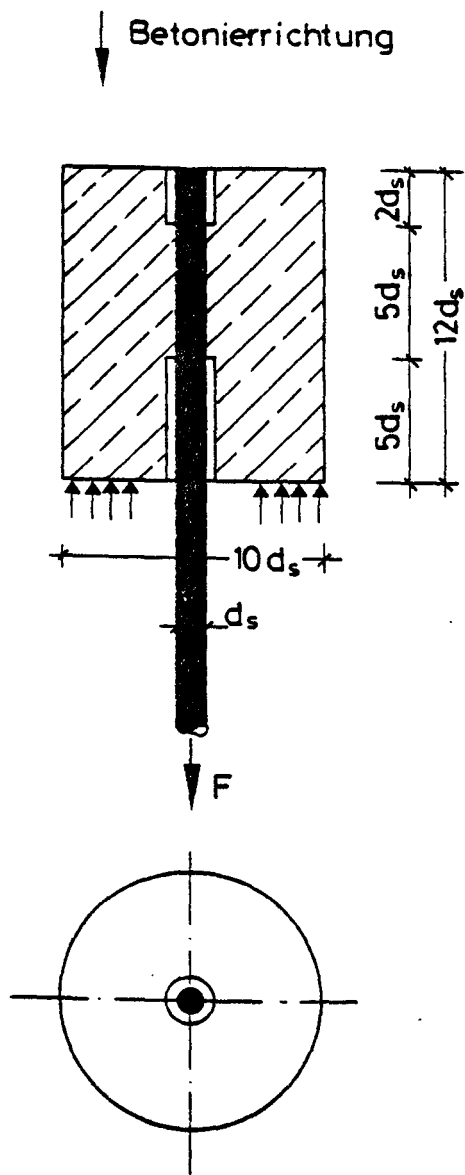
- bei höherer Frequenz $f > 1 \text{ Hz}$,
- bei längerer Belastungsdauer.

Die durch eine statische Dauerlast vorbelasteten Probekörper wurden nach Beendigung der Versuche einer Kurzzeitprüfung unterzogen. Die hier erreichten Verbundfestigkeiten betragen 86 bis 104 % der mittleren Verbundfestigkeiten der jungfräulichen Probekörper.

Literaturverzeichnis

- /1/ Franke, L.: Einfluß der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen); DAfStb, Heft 268, 1976
- /2/ Svensvik, B.: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Einschluß der Mitwirkung des Betons auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit; Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1981
- /3/ Edwards, A.D., Yannopoulos, P.J.: Local Bond-Stress-Slip Relationships under Repeated Loading; Magazine of Concrete Research, Vol. 30, No. 103, June 1978
- /4/ Perry, E.S., Jundi, N.: Pullout Bond Stress Distribution under Static and Dynamic Repeated Loadings; ACI-Journal, May 1969
- /5/ Rehm, G., Eligehausen, R.: Einfluß einer nicht ruhenden Belastung auf das Verbundverhalten von Rippenstählen; Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 6, 1977
- /6/ Rehm, G., Eligehausen, R.: Verbundverhalten gerippter Betonstähle mit kurzer Einbettungslänge bei nicht ruhender Belastung; Untersuchungsbericht 75/2, Technische Universität Stuttgart, 1975
- /7/ Rehm, G., Eligehausen, R.: Verbundverhalten von Rippenstäben mit langer Einbettungslänge bei nicht ruhender Belastung; Untersuchungsbericht 75/17, Technische Universität Stuttgart, 1975
- /8/ Rohrschneider, O.: Vergleich verschiedener Prüfverfahren für Verbundeigenschaften der Betonstähle; Diplomarbeit, Technische Universität München, 1975
- /9/ Janovic, K.: Bericht über den neuen konsolenförmigen Ausziehkörper als Vorschlag für ein allgemeingültiges Verbundverfahren. Bericht Nr. 1349 des Lehrstuhls für Massivbau der Technischen Universität München, 1979
- /10/ RILEM/CEB/FIP: Bond Test for Reinforcing Steel. I. Beam Test, II. Pull-out-Test, RILEM 3, No. 15, 1970
- /11/ Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung; DAfStb, Heft 144, 1962
- /12/ Alda, W.: Zum Schwingkriechen von Beton; Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978

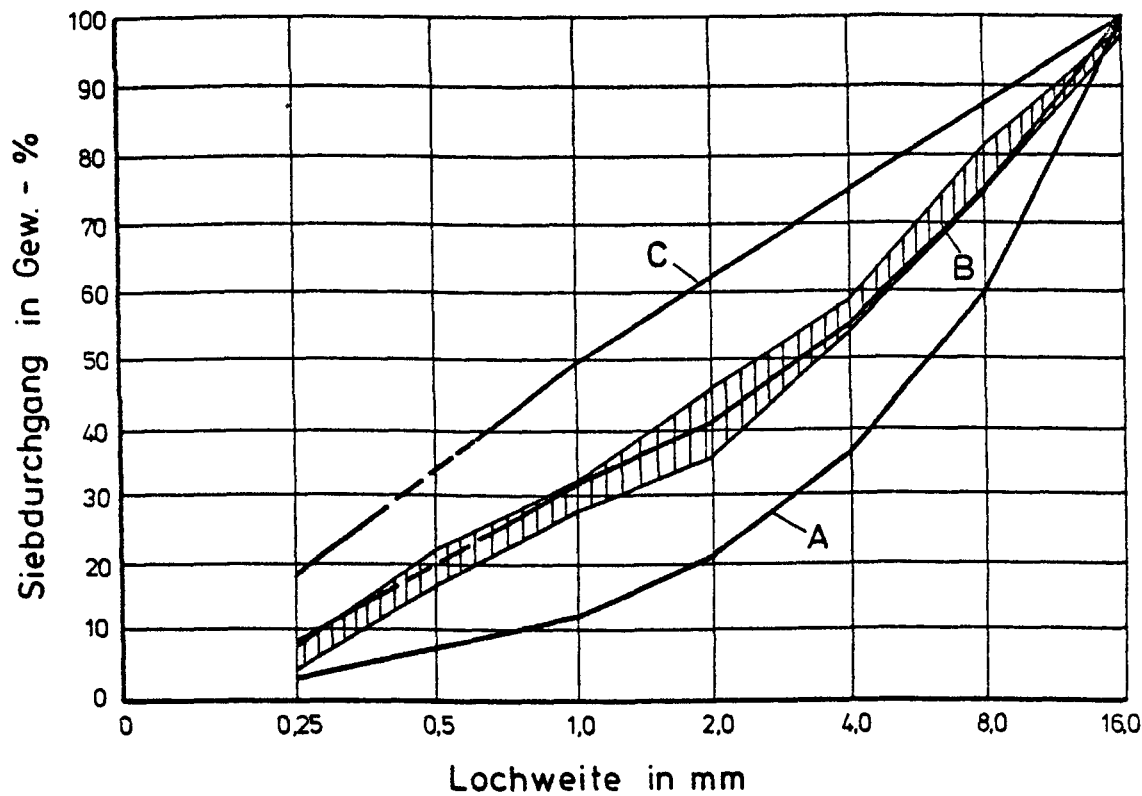
- /13/ Martin, M., Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen. Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen; DAfStb, Heft 319, 1981
- /14/ Rostásy, F.S., Kepp, B.: Time Dependence of Bond. Beitrag zur Internationalen Konferenz "Bond in Concrete", Paisley, Juni 1982, Tagungsbericht, herausgegeben von P. Bartos



Prüfkörper für Ausziehversuche

Kornzusammensetzung der einzelnen Betonierserien

Betonierserie	Durchgang in Gew.-% durch die Siebe							
	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
S1	6,0	18,0	27,7	34,9	53,8	75,8	98,6	100
S2	3,9	16,7	32,0	45,9	58,0	74,9	92,4	100
S3	7,3	21,5	29,5	39,4	55,6	79,8	98,5	100
S4	6,8	18,8	27,8	38,6	58,5	81,2	98,5	100
S5	6,2	18,1	27,3	39,2	55,4	77,2	97,4	100
S6	7,6	20,5	29,6	39,3	53,8	73,7	97,9	100



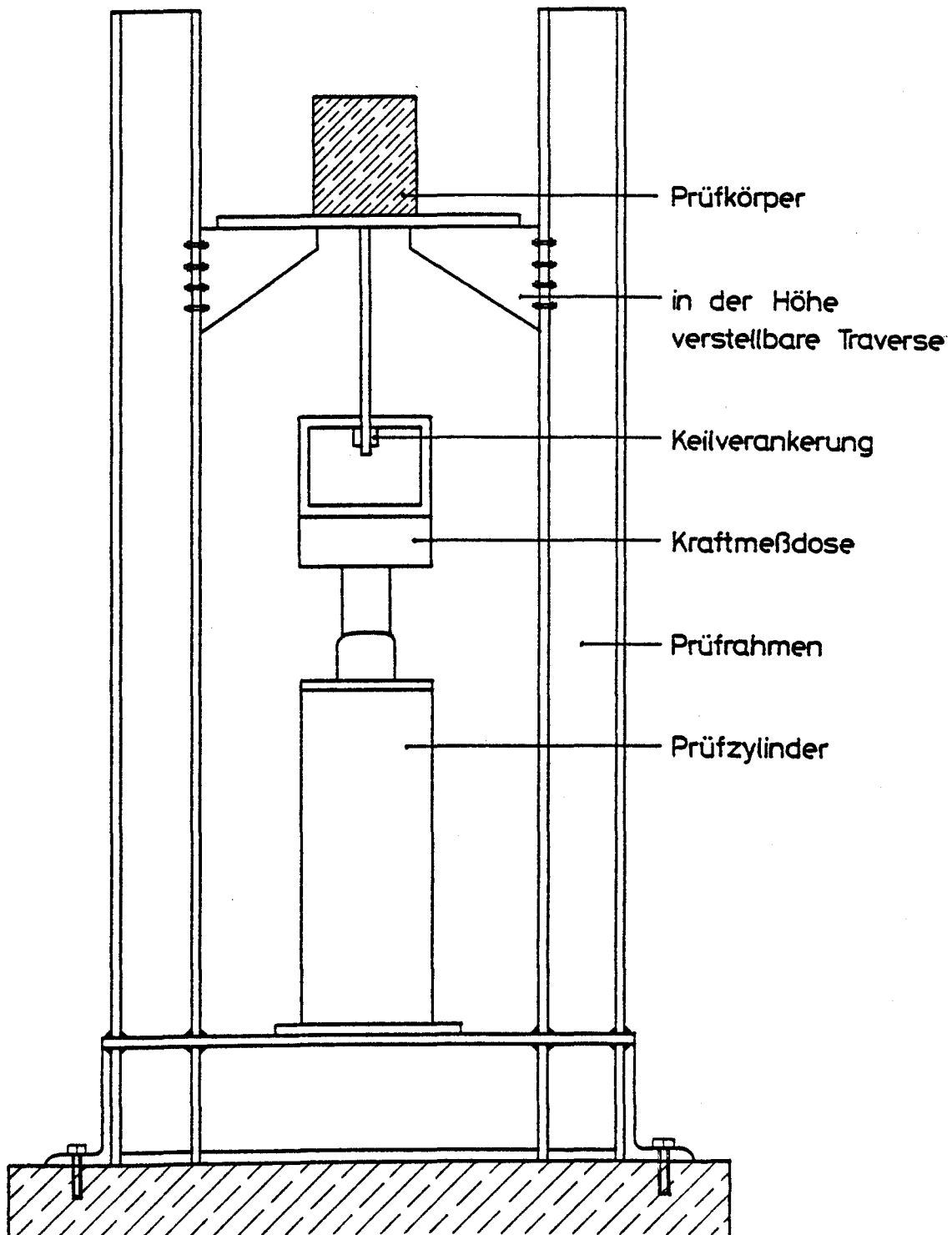
Zusammensetzung der verwendeten Betone

	Einheit	B25				B55	
		Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6
Zementart	-	PZ 35 F	PZ 35 F	PZ 35 F	PZ 35 F	PZ 35 F	PZ 35 F
Zementgehalt	kg/m³	242	240	252	248	386	380
Zuschlag 0 - 16 mm	kg/m³	1936	1920	1918	1904	1827	1800
Wassergehalt	kg/m³	212	210	220	217	178	190
W/Z-Wert	-	0,88	0,88	0,87	0,88	0,46	0,50
Verdichtungsmaß	-	1,08	1,06	1,05	1,06	1,18	1,20
Ausbreitmaß	cm	41,5	41,0	40,0	40,0	32,0	34,0
Frischbetonrohddichte	kg/m³	2,39	2,36	2,39	2,37	2,39	2,40

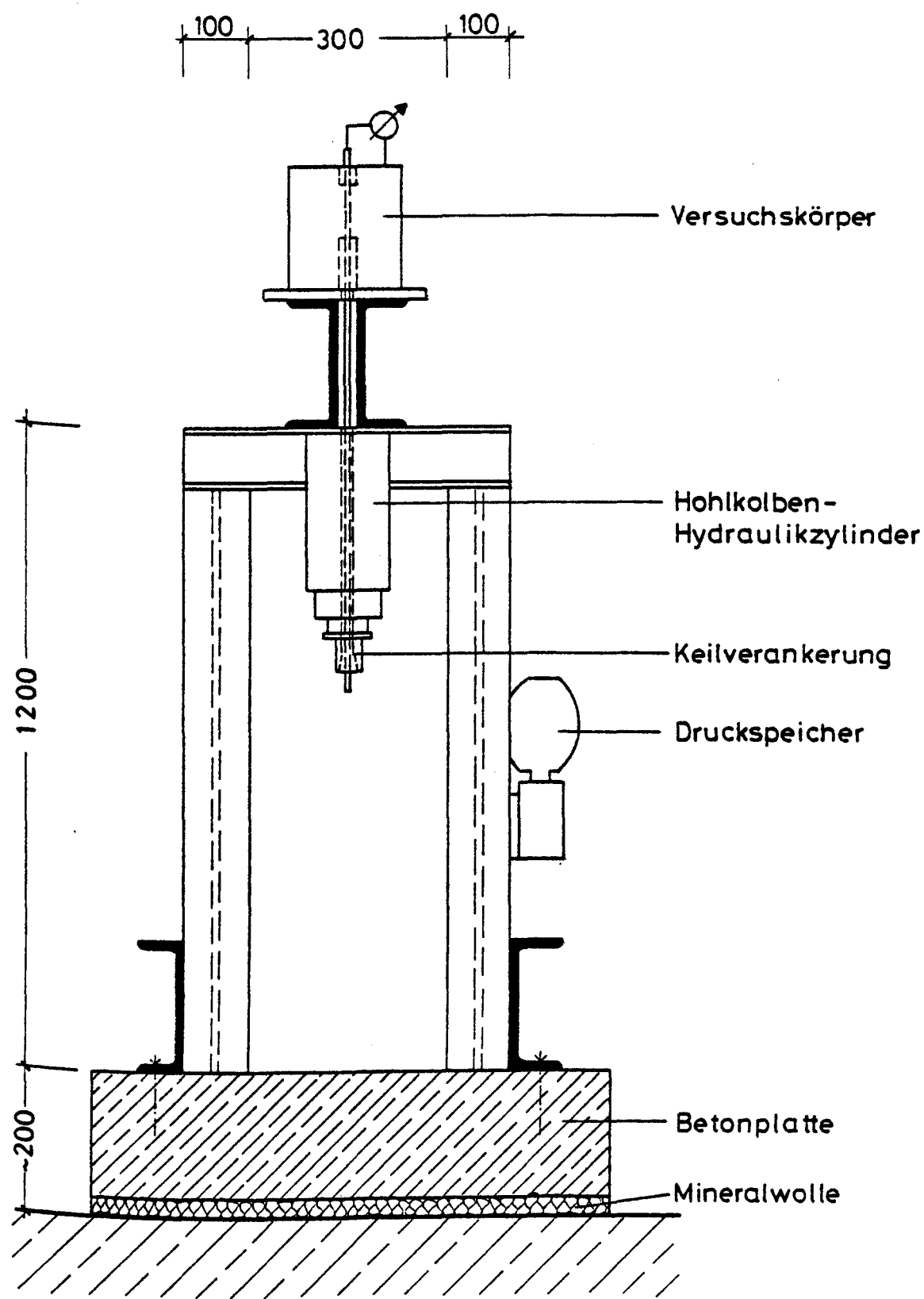
Festigkeitskennwerte der verwendeten Betone

	Einheit	B25				B55	
		Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6
β_{w28}^*	N/mm ²	34,0	25,0	34,0	35,0	62,0	57,0
Alter Versuchsanfang t_{vA}	Tage	180	134	393	279	13	102
β_{wvA}^*	N/mm ²	39,0	32,0	32,0	37,0	53,0	61,0
Alter Versuchsende t_{vE}	Tage	307	195	-	-	-	-
β_{wvE}^*	N/mm ²	39,0	31,0	-	-	-	-
β_{SZ}	N/mm ²	2,53	2,66	1,94	2,58	-	4,56

* Kantenlänge der Probewürfel 15 cm



Prüfstand für die Zugschwellversuche

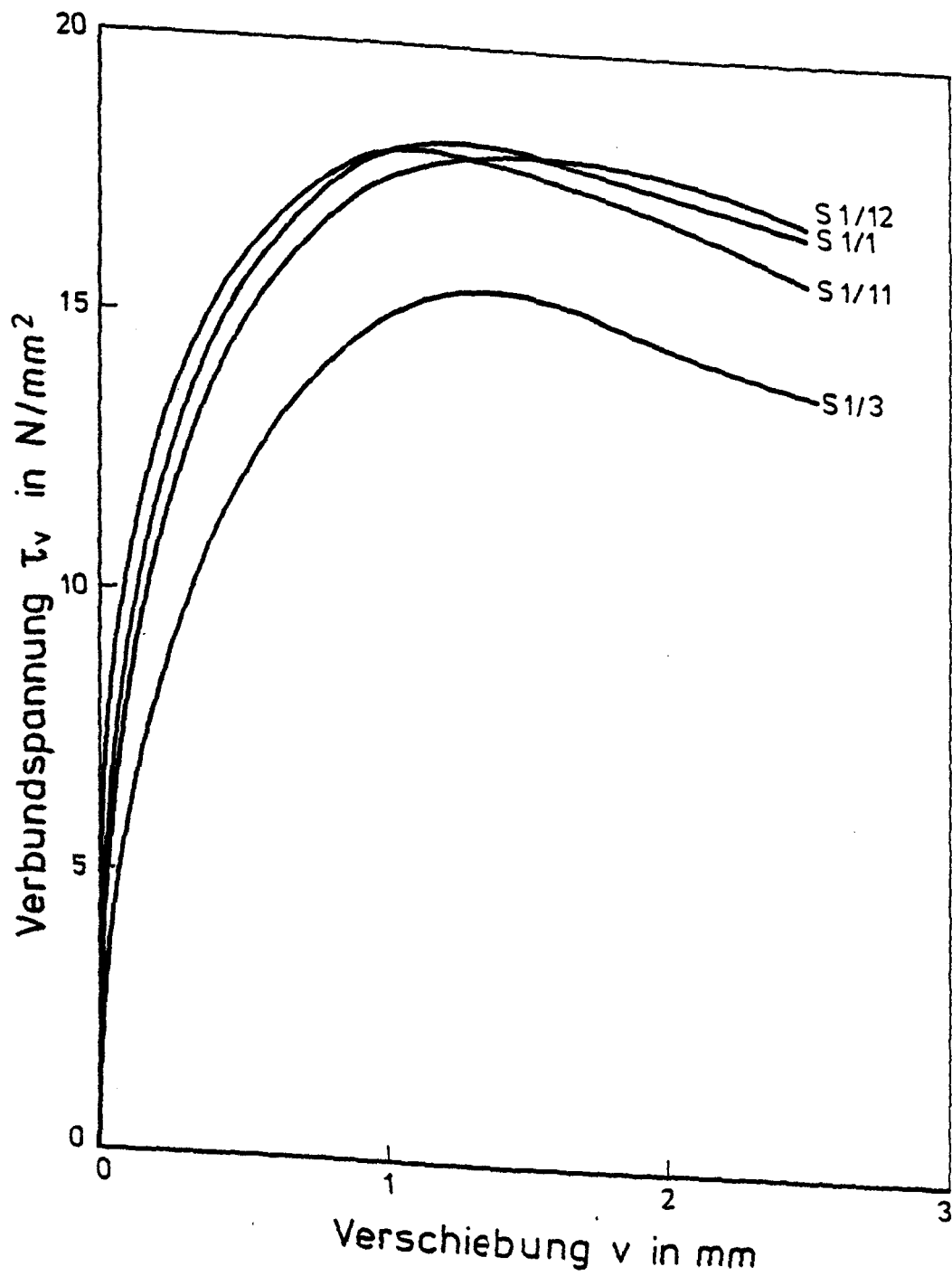


Prüfstand für die Kriechversuche unter konstanter Dauerlast

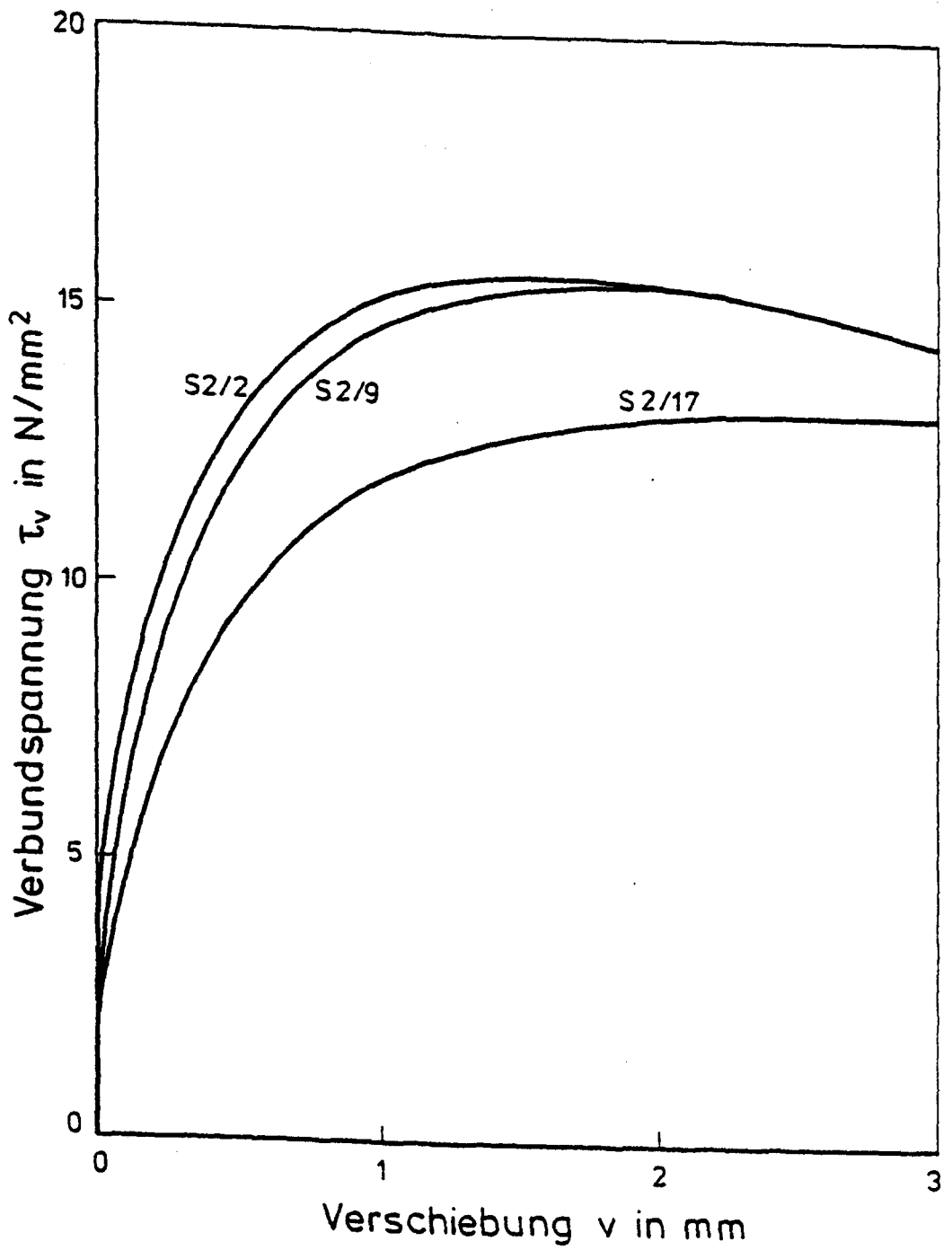
Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten Probekörper

Serie	Körper Nr.	β_{wvA} N/mm ²	Verbundspannung τ_v (N/mm ²)					v_u mm	τ_{vu}/β_{wvA}	Versagens- art
			$\tau_{v0,01}$	$\tau_{v0,1}$	$\tau_{v0,5}$	$\tau_{v1,0}$	τ_{vu}			
Serie 1	1	39,0	3,8	7,7	15,3	18,0	18,2	1,3	0,47	V
	3		2,0	5,0	12,1	15,1	15,7	1,4	0,40	V
	11		4,9	8,7	16,0	17,9	18,0	1,2	0,46	V
	12		4,0	7,5	14,7	17,5	18,0	1,6	0,46	V
	Mittelwert						17,5			
Serie 2	2	32,0	4,9	7,8	12,9	15,2	15,7	1,45	0,49	V
	4		-	-	-	-	17,0	-	0,53	V
	9		2,9	6,2	12,1	14,6	15,5	1,8	0,48	V
	17		2,9	4,7	9,5	11,9	13,1	2,1	0,41	V
	Mittelwert						15,3			
Serie 3	3	32,0	1,4	3,2	10,9	13,9	14,1	1,5	0,44	V
	15		0,87	2,4	9,7	13,1	14,5	1,7	0,45	V
	17		1,6	5,0	13,7	16,9	17,7	1,45	0,55	V
	Mittelwert						15,4			
Serie 4	5	37,0	1,66	5,38	14,92	18,22	19,05	1,5	0,31	V
	10		2,48	7,45	15,53	17,18	17,48	1,15	0,28	V
	11		1,25	3,52	11,80	14,50	15,12	1,35	0,25	V
	Mittelwert						17,22			
Serie 5	1	53,0	7,1	13,3	21,1	-	21,2	0,92	0,40	V
	5		3,5	9,9	21,4	21,7	22,2	1,7	0,42	V
	6		5,2	11,2	21,5	-	22,3	1,3	0,42	V
	Mittelwert						21,9			
Serie 6	1	61,0	3,32	11,80	27,75	29,82	29,90	1,1	0,29	V
	5		2,62	9,73	25,88	28,37	29,32	1,5	0,29	V
	15		2,48	12,22	27,13	30,03	30,28	1,05	0,30	V
	Mittelwert						29,83			

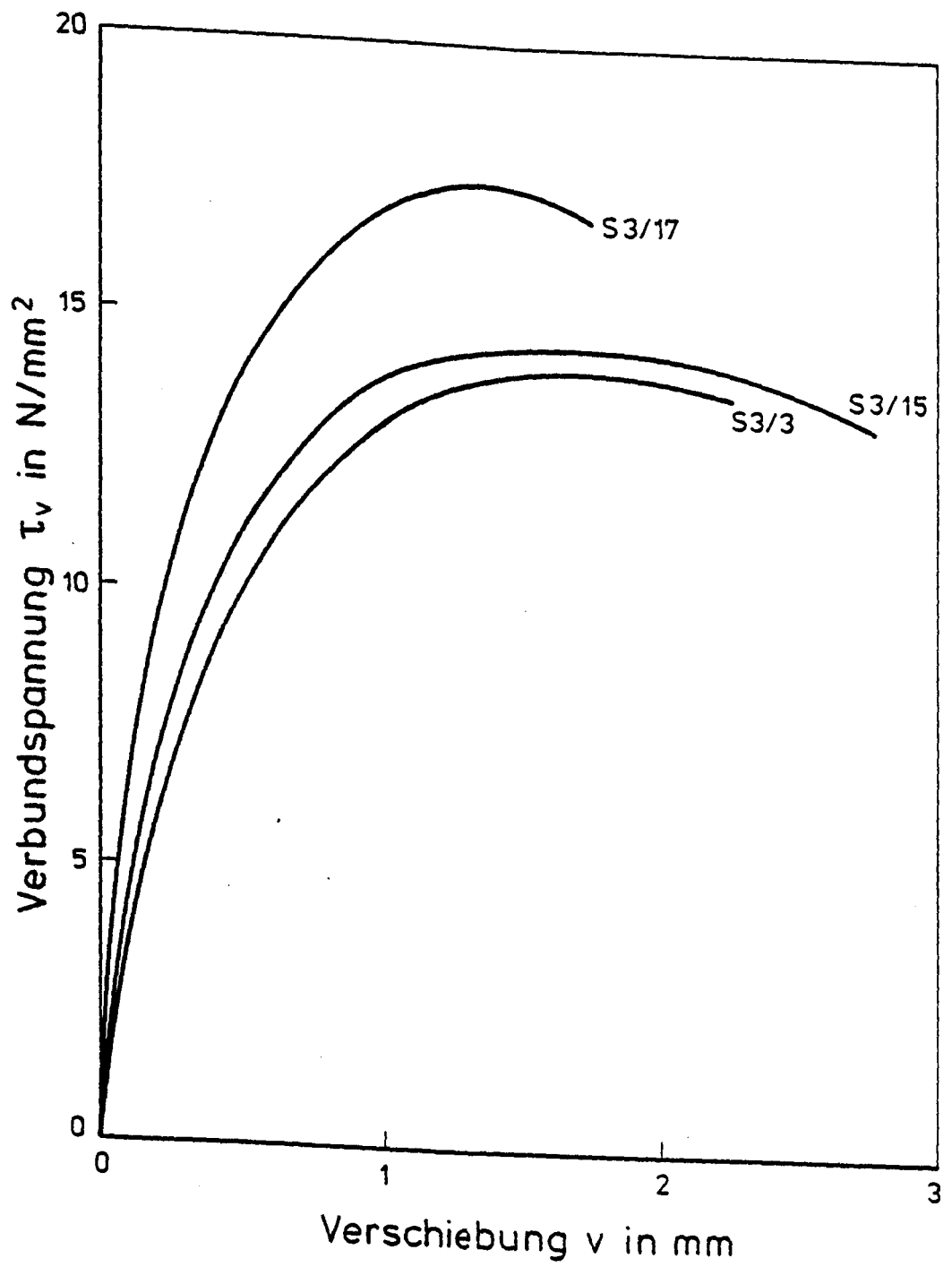
V = Verbundversagen



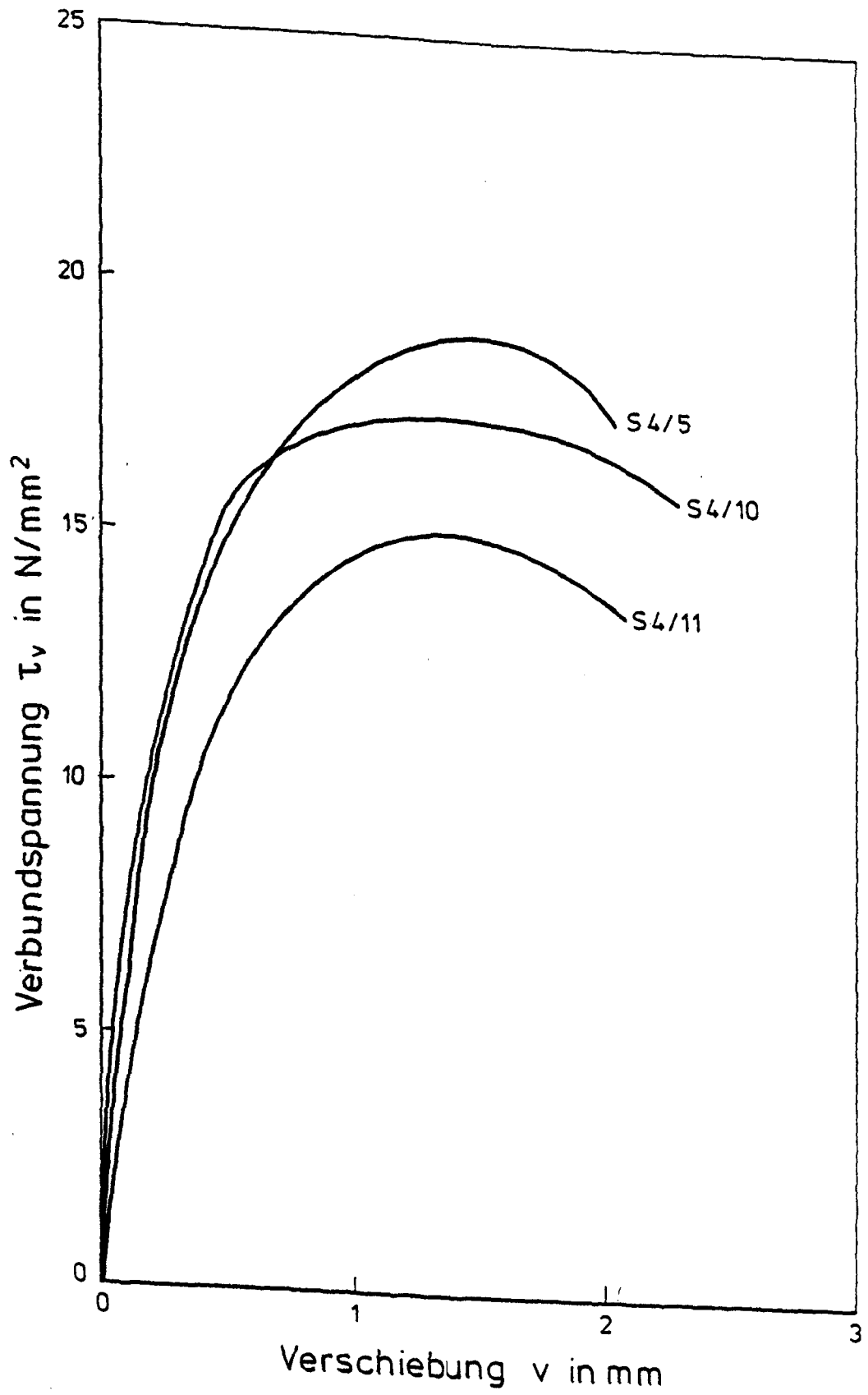
τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 1



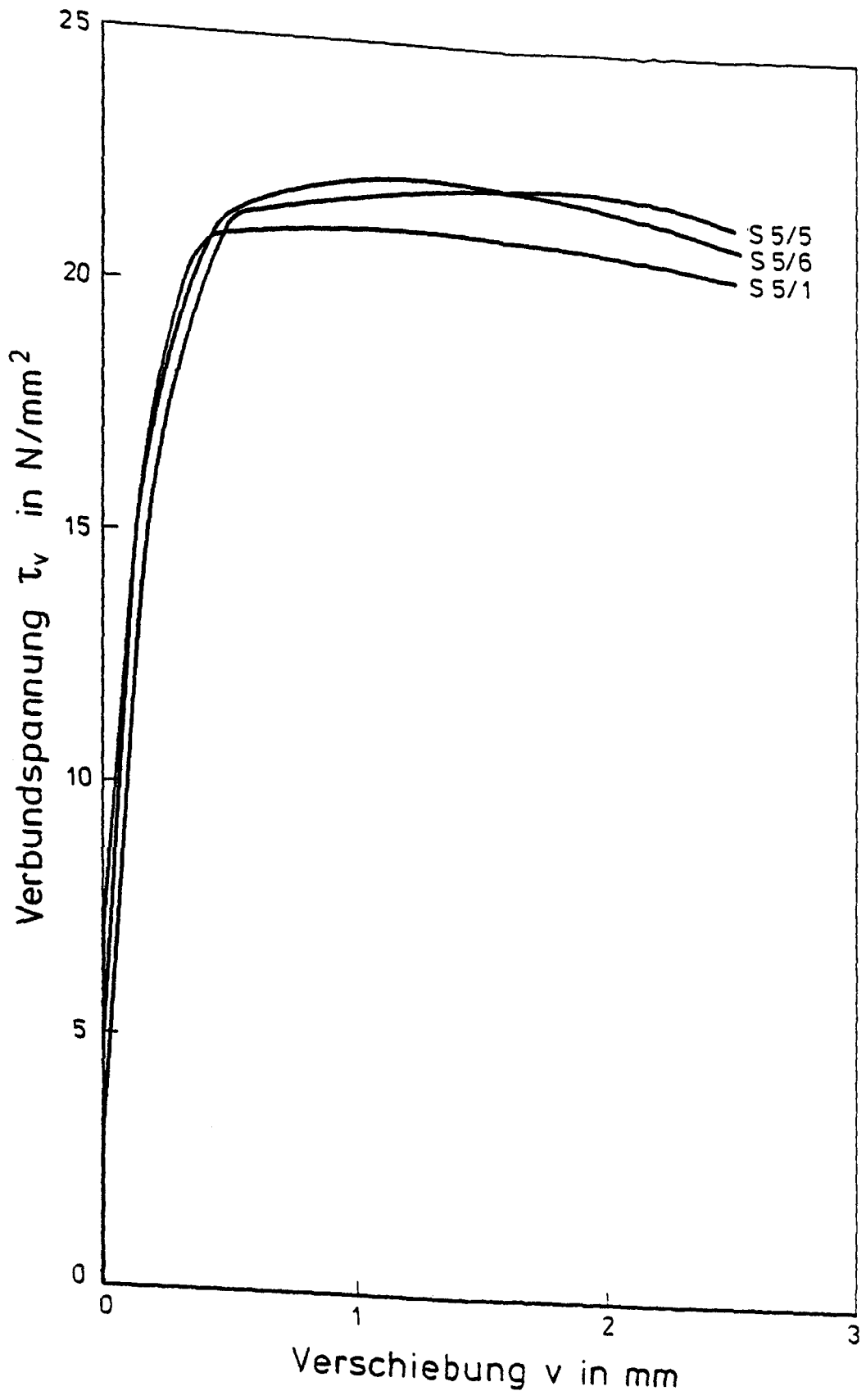
τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 2



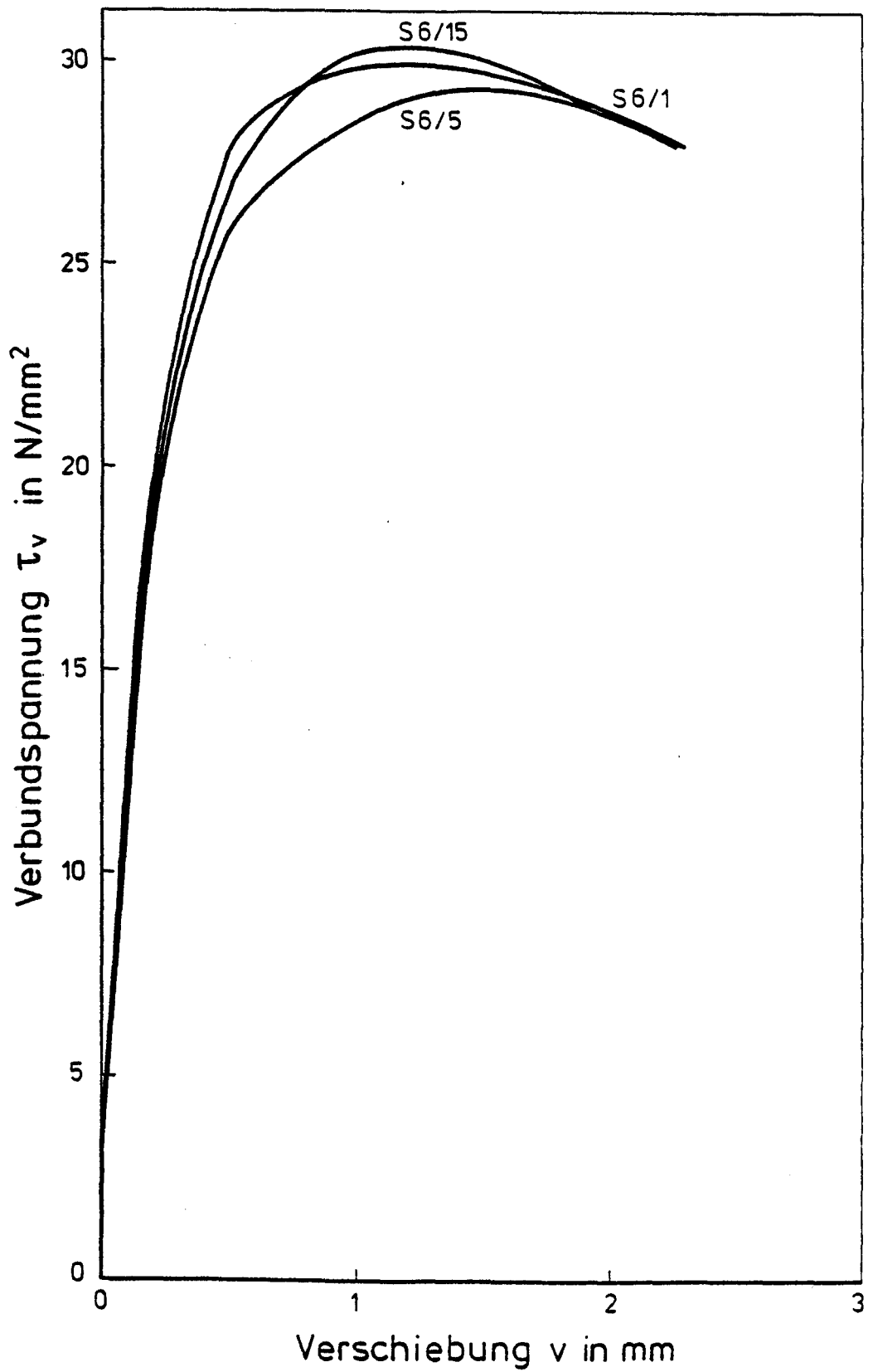
τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 3



τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 4



τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 5



τ_v - v -Beziehung der unvorbelasteten Probekörper der Serie 6

Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 (μ m)	Verschiebung v (μ m) unter Oberlast nach LW						N_u	$\tau_{vu(vE)}$ N/mm ²	$\tau_{vu(vE)}/$ β_{wvA}	$\tau_{vu(vE)}/$ τ_{vum}
		Oberlast	Unterlast			10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶				
1	4	0,7	0,1	5 Hz	-	-	-	607	756	-	-	100.571 V	-	-	-
	7				224	272	336	390	440	535	-	710.000 StV	-	-	-
	15				178	232	300	358	416	506	-	739.000 StV	21,74	0,56	1,24
	9	0,7	0,1	1 Hz	360	432	556	736	1320	-	-	14.318 V	-	-	-
	19				328	420	580	780	1072	-	-	36.000 V	-	-	-
	20				310	384	492	607	778	1840	-	105.680 V	-	-	-
	17	0,7	0,4	5 Hz	168	194	238	252	277	312	360	$> 1,18 \cdot 10^6$	22,4	0,57	1,27
	18				230	268	316	356	389	437	497	$> 1,18 \cdot 10^6$	19,23	0,49	1,09
	8	0,7	0,4	1 Hz	340	392	458	522	580	651	-	> 330.000	18,6	0,48	1,06
	10				320	368	432	496	647	759	-	> 520.000	17,5	0,45	1,0
	6	0,7	0,25	* 5 Hz	52	74	108	136	160	210	-	$> 1,75 \cdot 10^6$	20,63	0,53	1,18

* bis 520 LW f = 1 Hz

V = Verbundbruch

StV = Stahlversagen

Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 (μm)	Verschiebung v (μm)						N_u	$\tau_{vu}(vE)$ N/mm ²	$\tau_{vu}(vE)/$ β_{wvA}	$\tau_{vu}(vE)/$ τ_{vum}
		Oberlast	Unterlast			10	10 ²	10 ³	10 ⁴	Oberlast 10 ⁵	nach LW 10 ⁶				
2	11	0,7	0,25	5 Hz	252 *	334	435	473	542	623	741	$> 2 \cdot 10^6$	16,0	0,50	1,05
	15				310 *	332	423	469	518	608	787	$> 2 \cdot 10^6$	15,4	0,48	1,01
	18				756 *	808	1000	1296	1680	-	-	26.000 V	-	-	-
	7	0,7	0,25	1 Hz	312 *	392	468	544	636	762	-	> 251.740	15,2	0,48	0,99
	14				296 *	335	449	551	668	785	-	> 255.800	15,3	0,48	1,00
	5	0,7	0,25	0,2 Hz	272	308	351	402	468	-	-	> 70.160	16,05	0,50	1,05
	6				536	592	712	836	967	-	-	> 90.400	14,8	0,46	0,96
	10				472 *	576	726	867	1048	-	-	> 51.890	13,9	0,44	0,91
	16				448 *	528	633	729	857	1056	-	> 107.000	14,8	0,46	0,96
	1	0,8	0,25	1 Hz	404	472	547	643	752	924	-	> 971.770	15,8	0,49	1,03
	20				748	856	1122	-	-	-	-	1010 V	-	-	-

* Mittellast angefahren

Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 (μ m)	Verschiebung v (μ m) unter Oberlast nach LW						N_u	$\tau_{vu}(vE)$ N/mm ²	$\tau_{vu}(vE)/$ σ_{wvA}	$\tau_{vu}(vE)/$ τ_{vum}
		Oberlast	Unterlast			10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶				
3	4	0,7	0,25	5 Hz	272	308	360	408	448	488	-	647.000 StV	18,1	0,57	1,18
	7				288	320 *	376 *	536	632	760	-	949.000 V	-	-	-
	19				336	358	412	496	544	-	816	> 10 ⁶	15,4	0,48	1,00
	2	0,7	0,25	1 Hz	284	320	352	-	-	-	544	> 10 ⁶	17,3	0,54	1,13
	12				212	220	256	276	304	331	408	> 10 ⁶	18,3	0,57	1,19
	13				412	416	424	436	446	-	824	> 10 ⁶	16,2	0,51	1,05
	6	0,7	0,1	5 Hz	280	300 *	340 *	504	600	824	-	311.000 V	-	-	-
	18				440	490 *	530 *	736	920	-	-	159.690 V	-	-	-
	5	0,7	0,1	1 Hz	272	296	360	412	466	640	-	871.000 V	-	-	-
	10				170	230	288	347	407	501	944	> 10 ⁶	17,05	0,53	1,11
	1	0,7	0,4	5 Hz	300	308	312	322	331	352	376	> 10 ⁶	17,3	0,54	1,12
	8	0,7	0,4	1 Hz	296	324	344	352	-	-	448	> 10 ⁶	16,7	0,52	1,09

* tatsächliche Oberspannung entsprach nicht der vorgegebenen Oberspannung τ_v^0

Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 (μ m)	Verschiebung v (μ m) unter Oberlast nach LW						N_u	$\tau_{vu}(vE)$ N/mm ²	$\tau_{vu}(vE)/$ β_{WVA}	$\tau_{vu}(vE)/$ τ_{vum}
4	14	0,8	0,2	1 Hz	440	516	592	688	832	-	-	586.000 V	-	-	-
	19				584	676	916	-	-	-	-	1030 V	-	-	-
	2	0,8	0,2	5 Hz	424	460	546	748	936	1232	-	313.000 V	-	-	-
	13				436	468	500	712	912	-	-	26.450 V	-	-	-
	18				248	266	306	368	420	512	676	$> 10^6$	20,05	0,54	1,16
	4	0,8	0,5	1 Hz	544	600	664	800	1120	-	-	73.740 V	-	-	-
	16				* 836	992	1320	-	-	-	-	150 V	-	-	-
	7	0,8	0,5	5 Hz	480	520	548	594	652	720	800	$> 10^6$	19,47	0,53	1,13
	8				260	280	292	312	336	368	406	$> 10^6$	23,19	0,63	1,35
	9	0,6	0	1 Hz	180	220	267	320	427	525	995	$> 10^6$	17,40	0,47	1,01
	12				204	224	276	316	380	447	569	$> 10^6$	19,30	0,52	1,12
	15	0,6	0	5 Hz	317	356	480	748	1240	-	-	23.000 V	-	-	-
	17				251	270	352	483	580	802	-	275.000 V	-	-	-

* Stahlstab war stark gekrümmt

Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

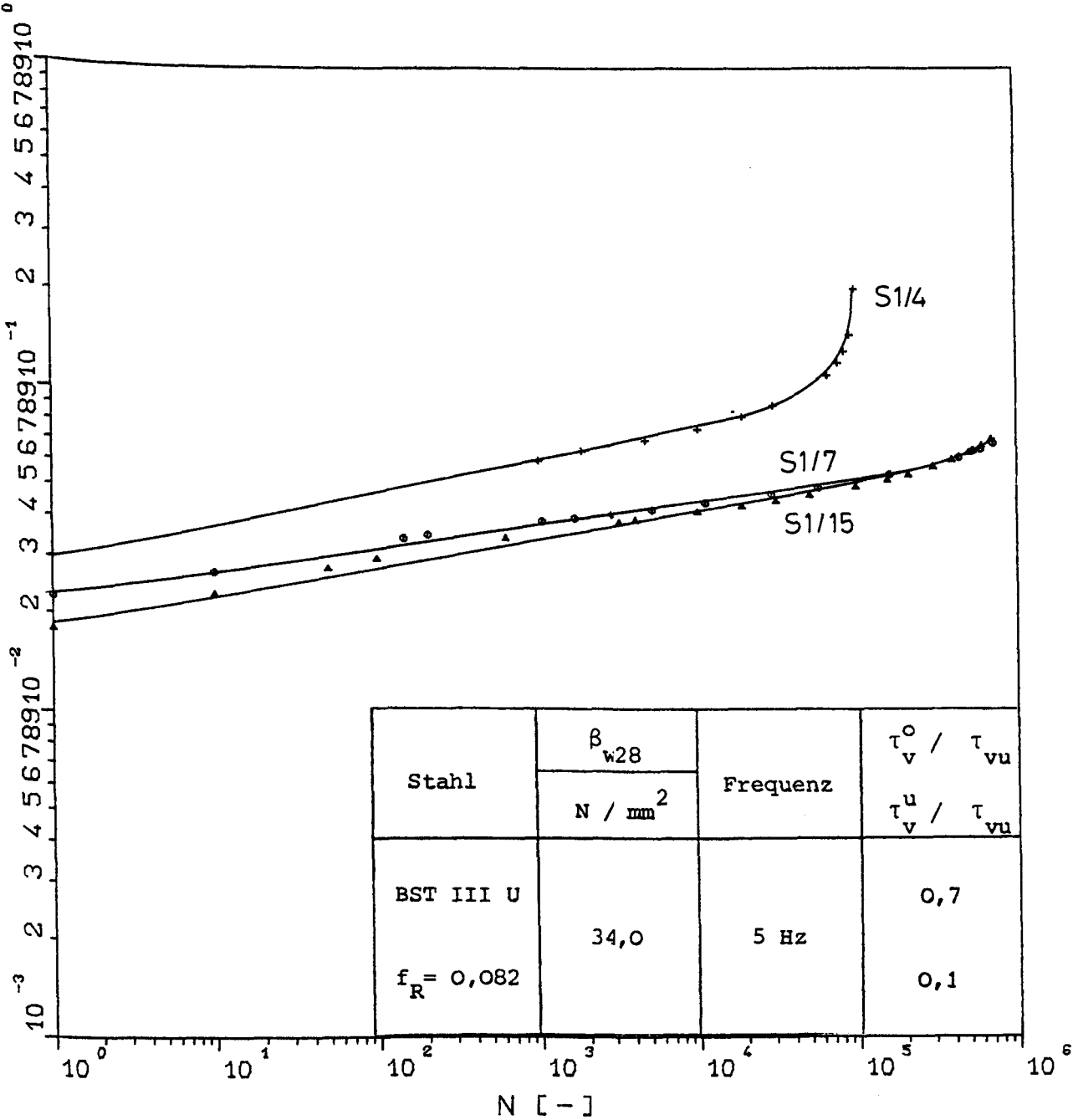
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 ($\mu\text{ m}$)	Verschiebung v ($\mu\text{ m}$) unter Oberlast nach LW					
		Oberlast	Unterlast			10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
5	3	0,7	0,25	1 Hz	220	228	264	301	358	436	-
	8				264	280	332	382	468	569	-
	16				178	184	220	252	303	376	433

13	14	15	16
N_u	$\tau_{vu(vE)}$ N/mm^2	$\tau_{vu(vE)}/$ β_{wvA}	$\tau_{vu(vE)}/$ τ_{vum}
> 310.000	22,24	0,42	1,02
> 180.000	22,64	0,43	1,04
> 10^6	23,96	0,45	1,10

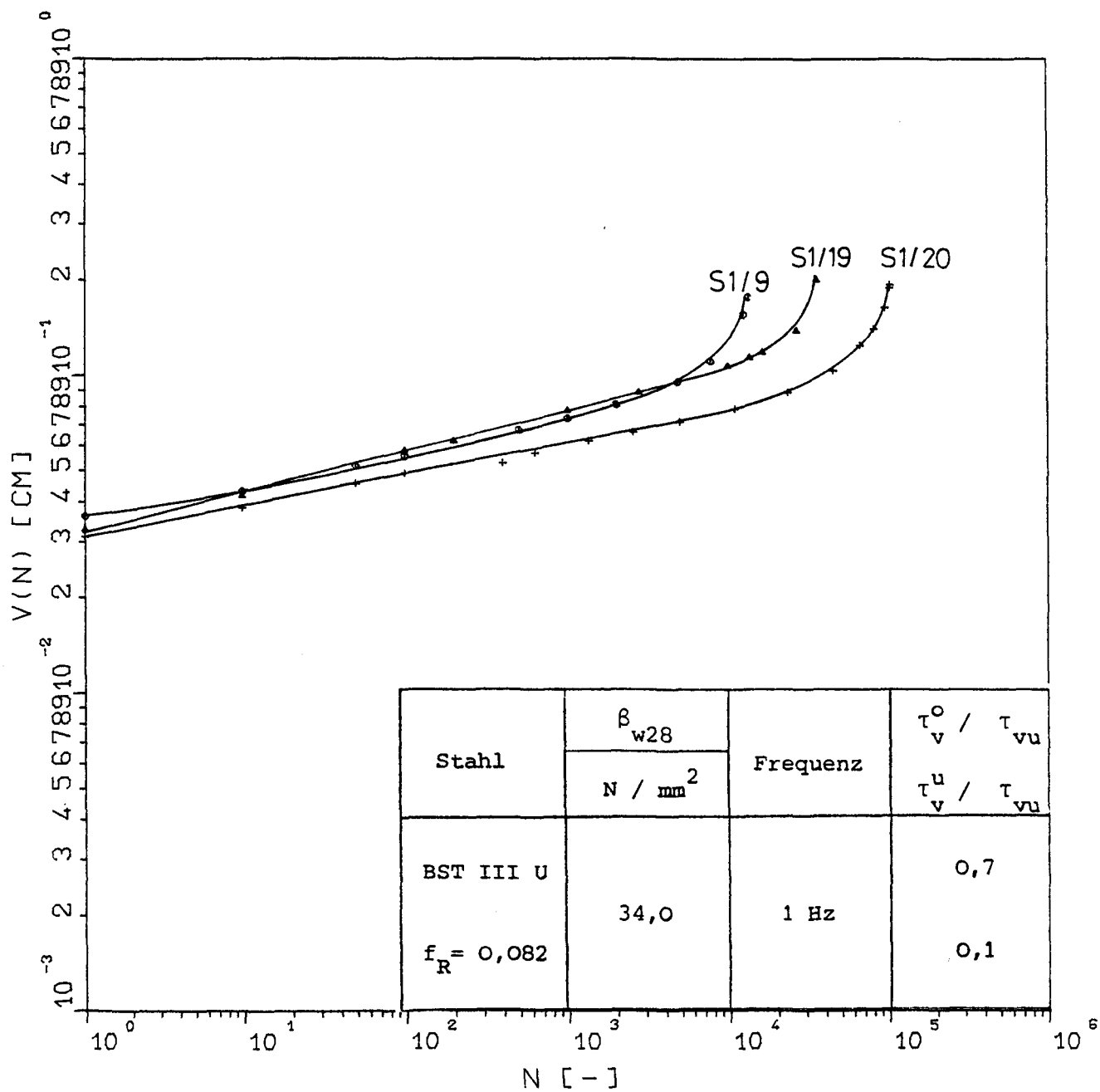
Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugschwellversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Serie	Körper Nr.	Belastungsgrad		Frequenz	v_0 (μ m)	Verschiebung v (μ m) unter Oberlast nach LW						N_u	$\tau_{vu}(vE)$ N/mm ²	$\tau_{vu}(vE)/\beta_{WvA}$	$\tau_{vu}(vE)/\tau_{vum}$
		Oberlast	Unterlast			10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶				
6	10 16	0,8	0,2	1 Hz	468 364	548 396	920 512	- 696	- -	- -	- -	550 V 9280 V	- -	- -	- -
	2 11	0,8	0,2	5 Hz	343 255	359 267	522 336	873 406	- 496	- 672	- -	4608 V 348.500 V	- -	- -	- -
	6 12	0,8	0,5	1 Hz	380 260	428 304	492 321	588 360	707 -	- -	1038 652	> 10 ⁶ > 10 ⁶	32,75 33,30	0,54 0,55	1,10 1,12
	18 20	0,8	0,5	5 Hz	416 260	480 268	515 328	628 377	792 420	1048 -	1382 577	> 10 ⁶ > 10 ⁶	29,41 35,95	0,48 0,59	0,99 1,21
	4 8	0,6	0	1 Hz	256 160	288 172	436 210	596 244	- 296	- 377	- -	10.067 V 538.147 StV	- 30,90	- 0,51	- 1,04
	7 19 *	0,6	0	5 Hz	158 172	164 176	168 214	226 260	- 320	- -	421 1122	> 10 ⁶ > 10 ⁶	33,34 31,48	0,547 0,516	1,12 1,06

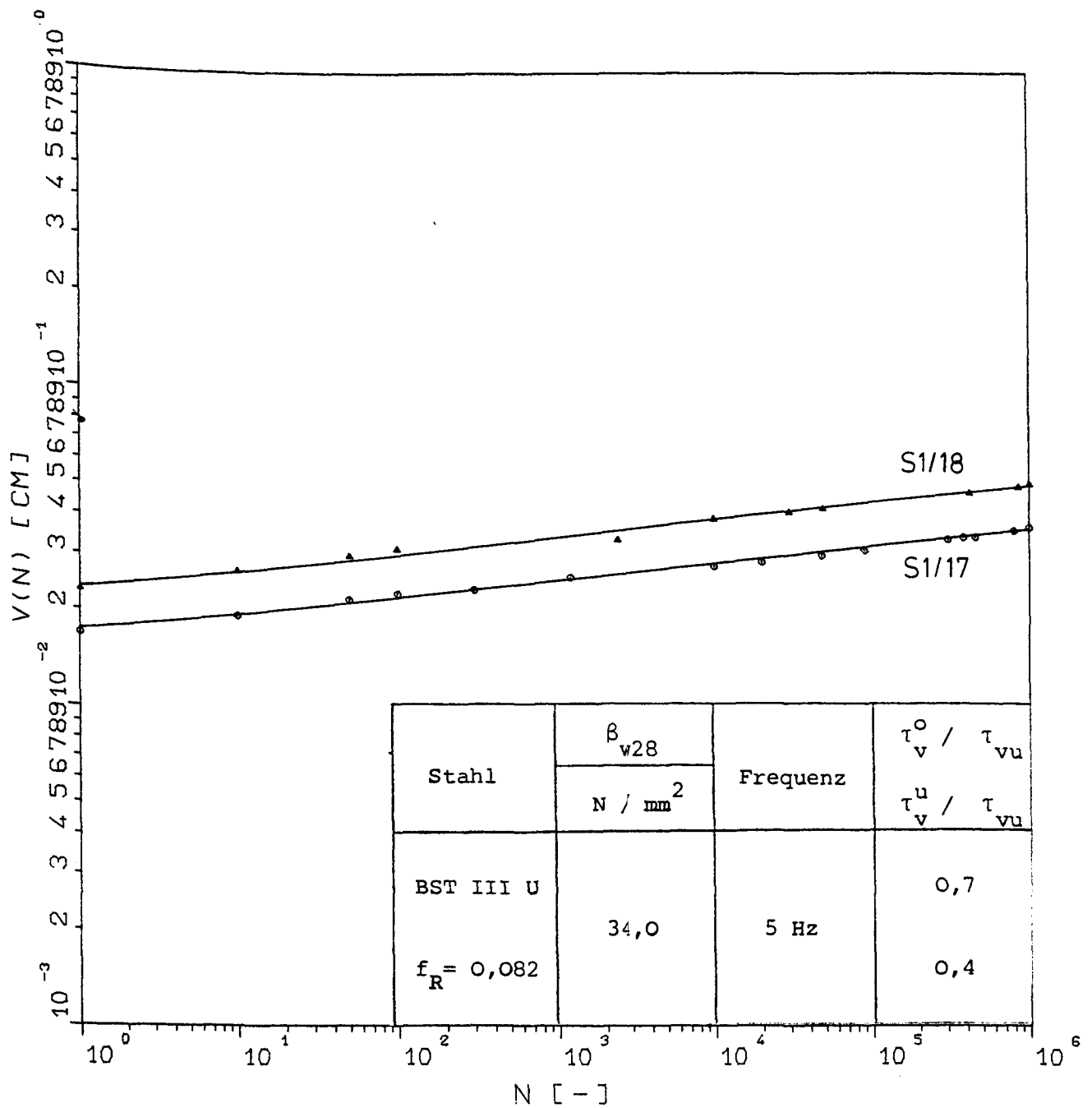
* Stahlbruch bei N = 656.500



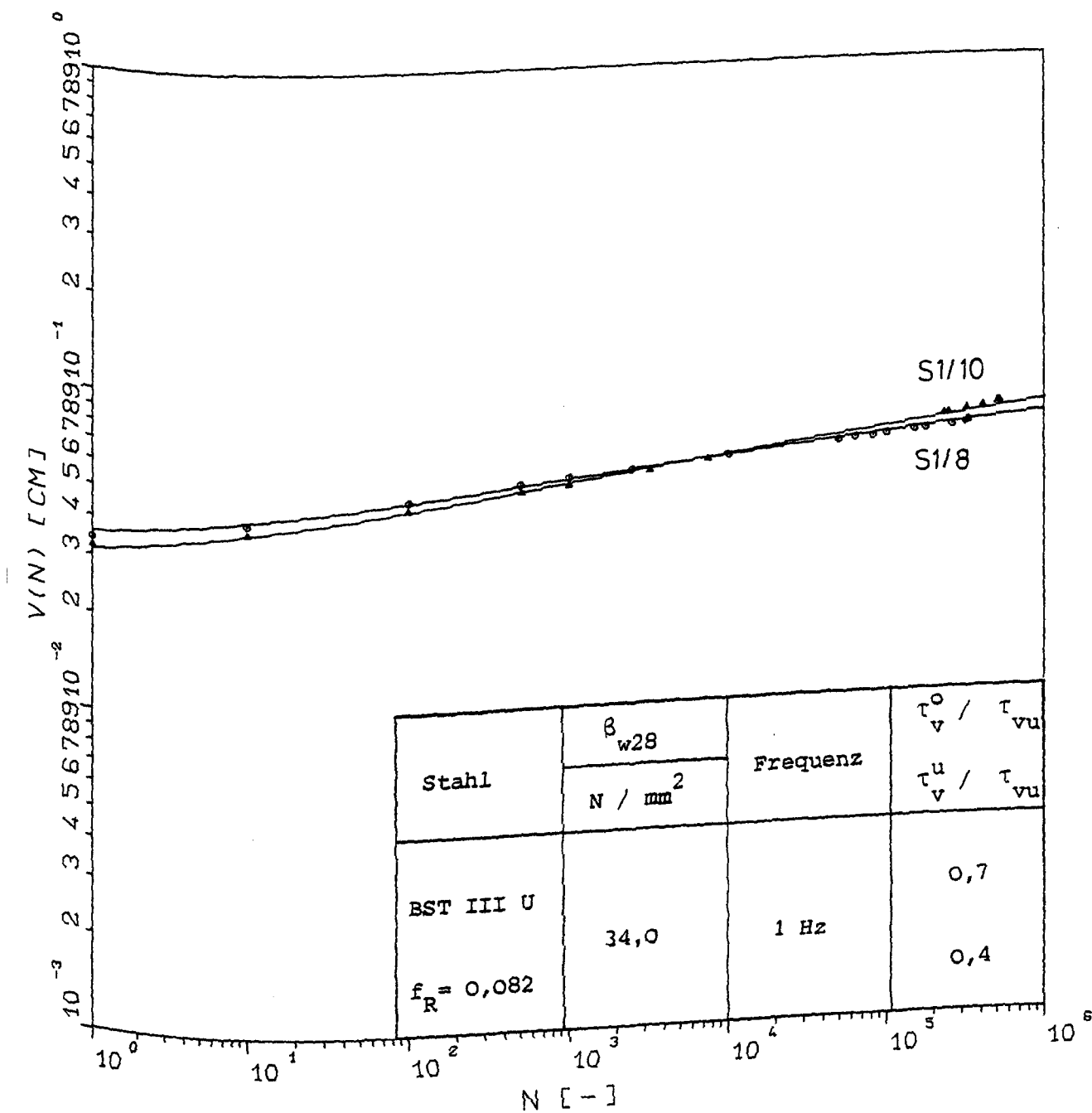
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie1, Körper Nr.4, 7 und 15)



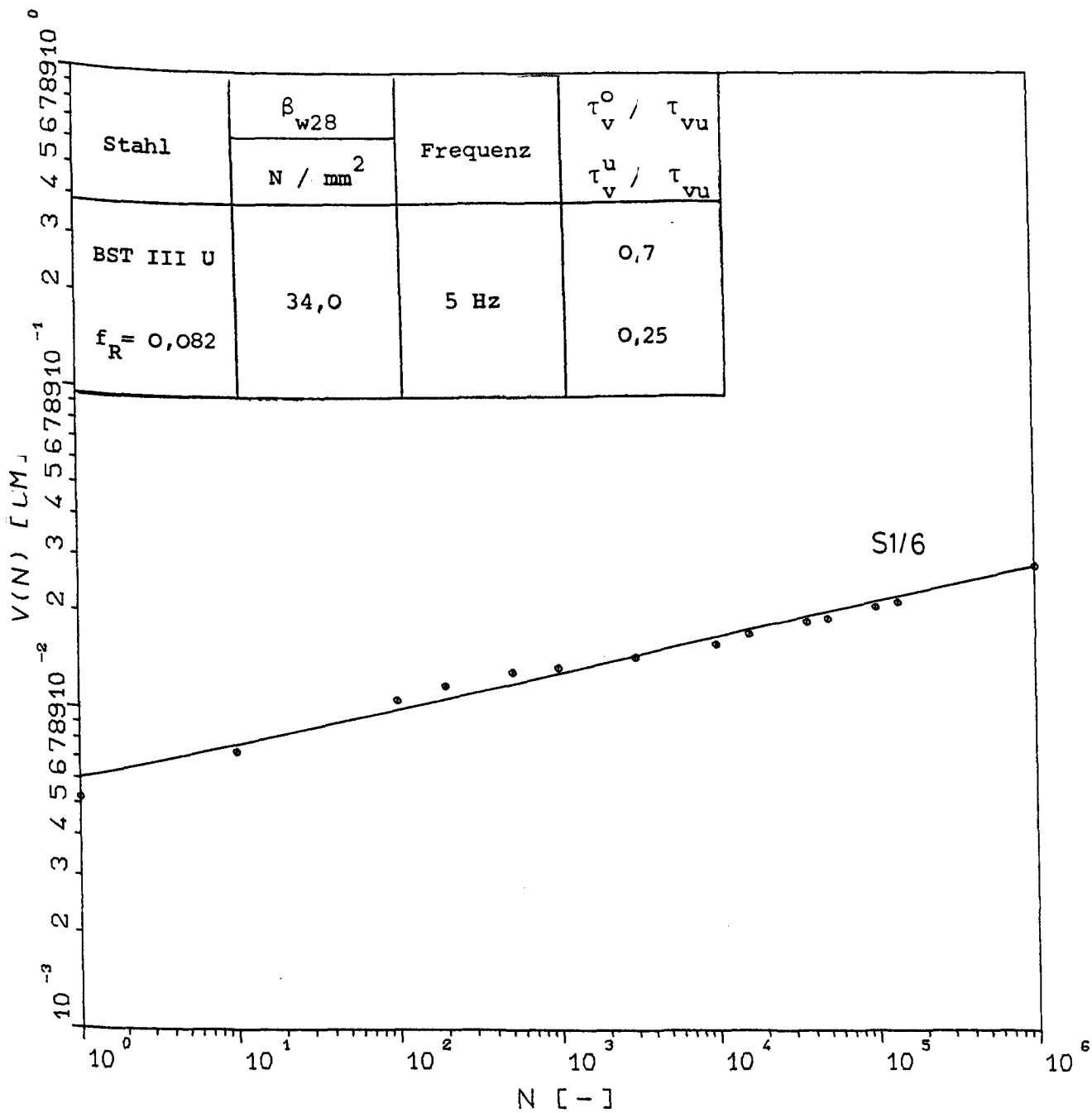
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 1, Körper Nr. 9, 19 und 20)



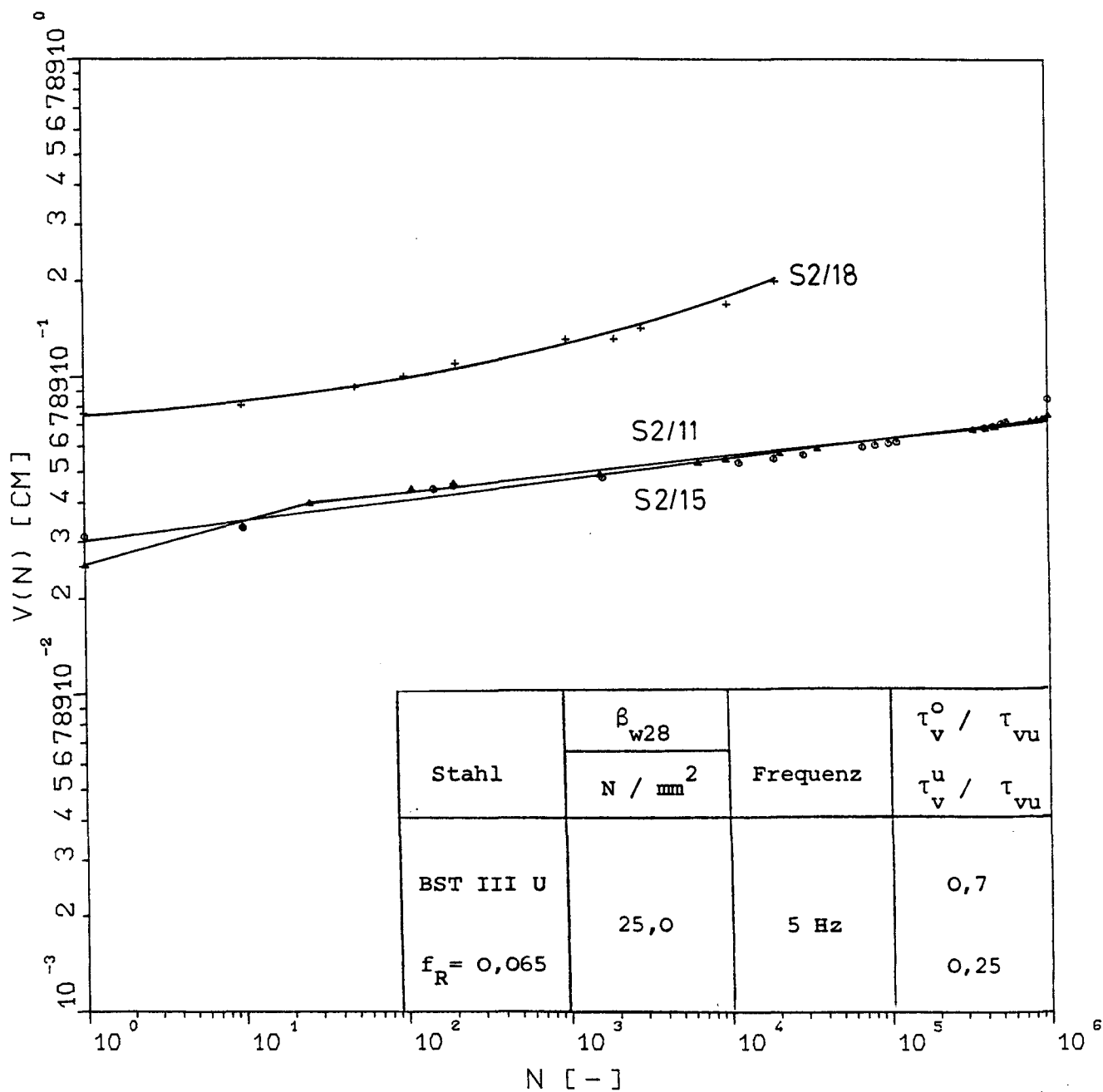
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 1, Körper Nr. 17 und 18)



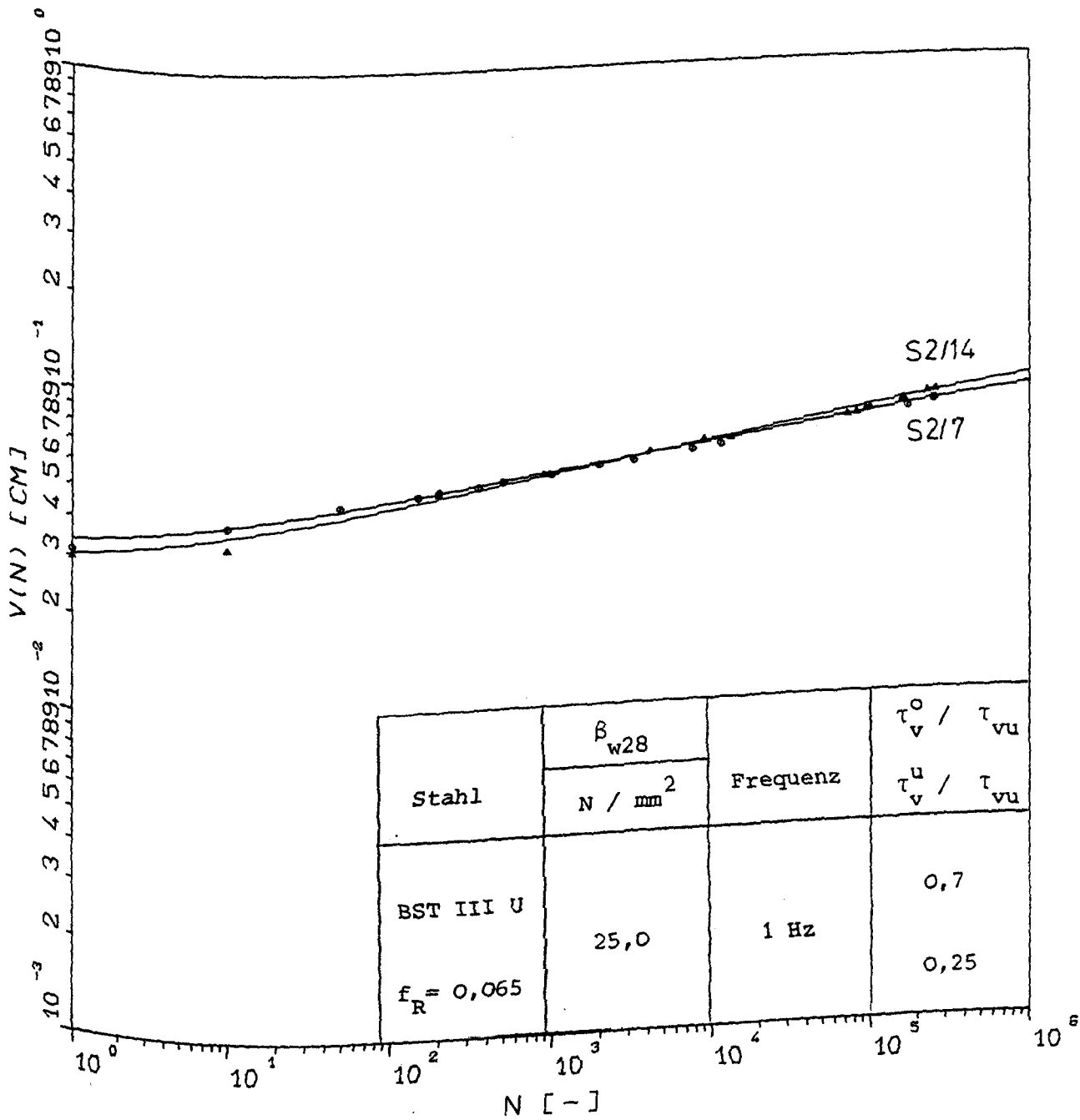
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 1, Körper Nr. 8 und 10)



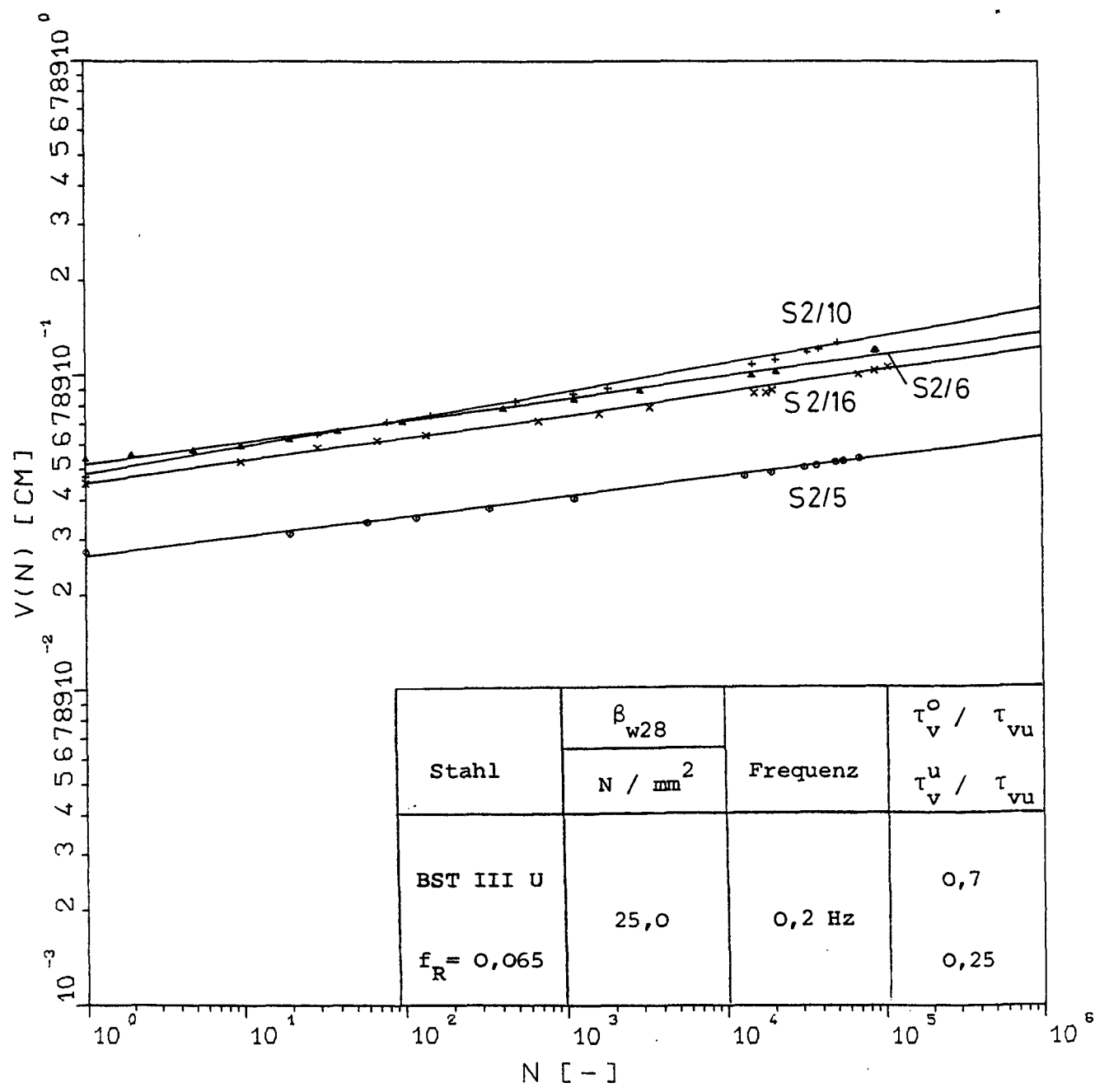
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 1, Körper Nr. 6)



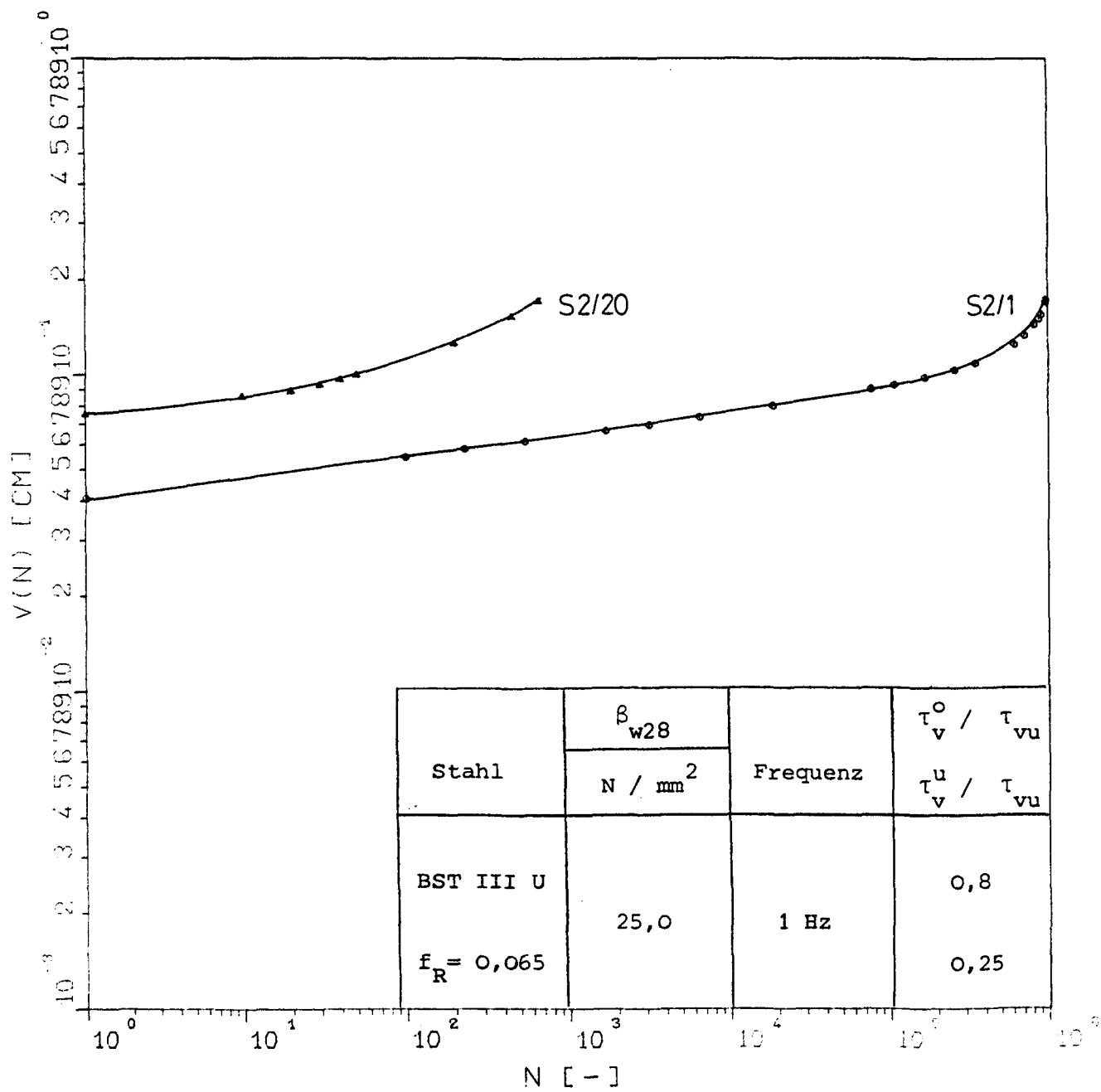
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 1, Körper Nr. 11, 15 und 18)



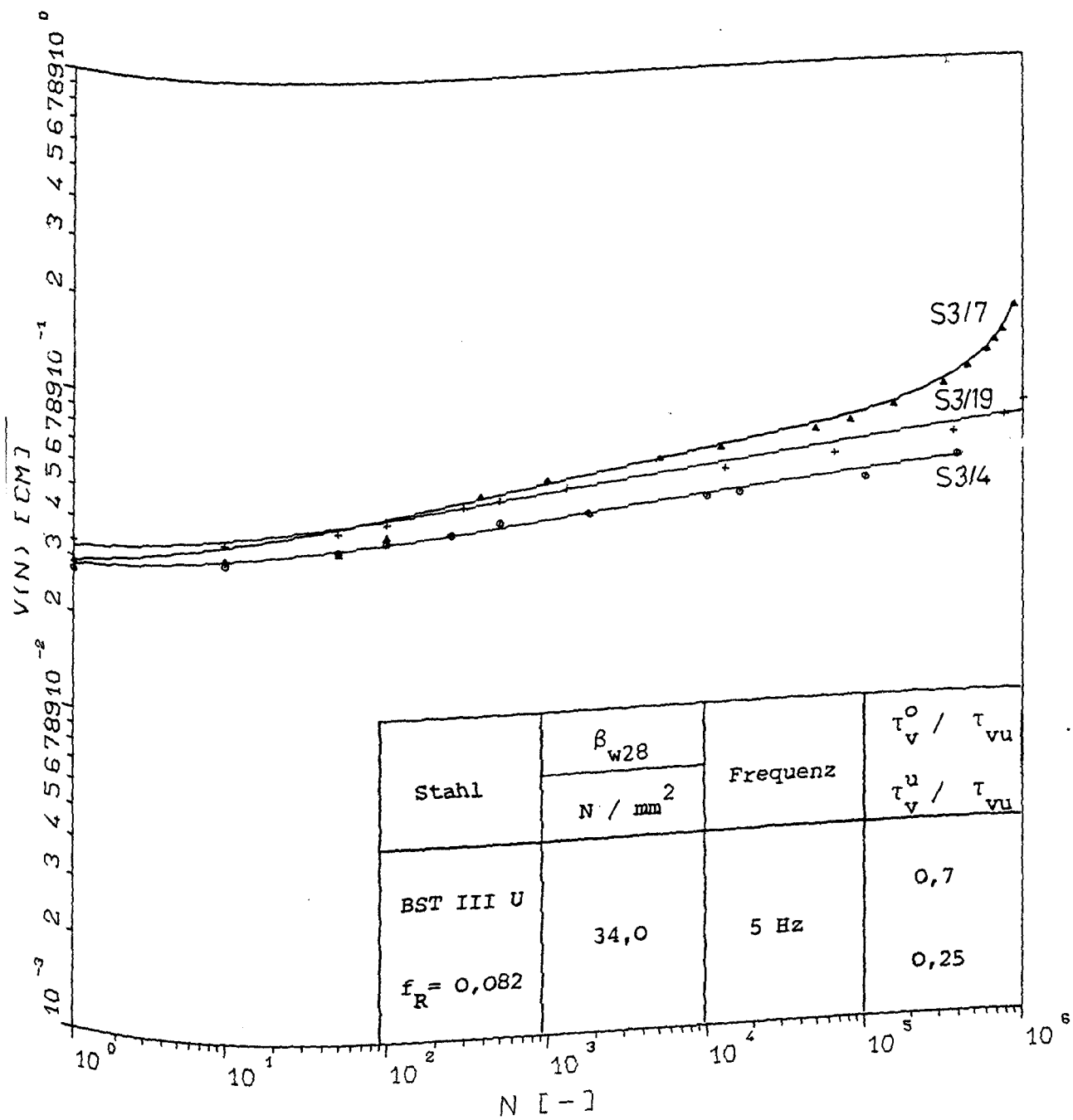
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 2, Körper Nr. 7 und 14)



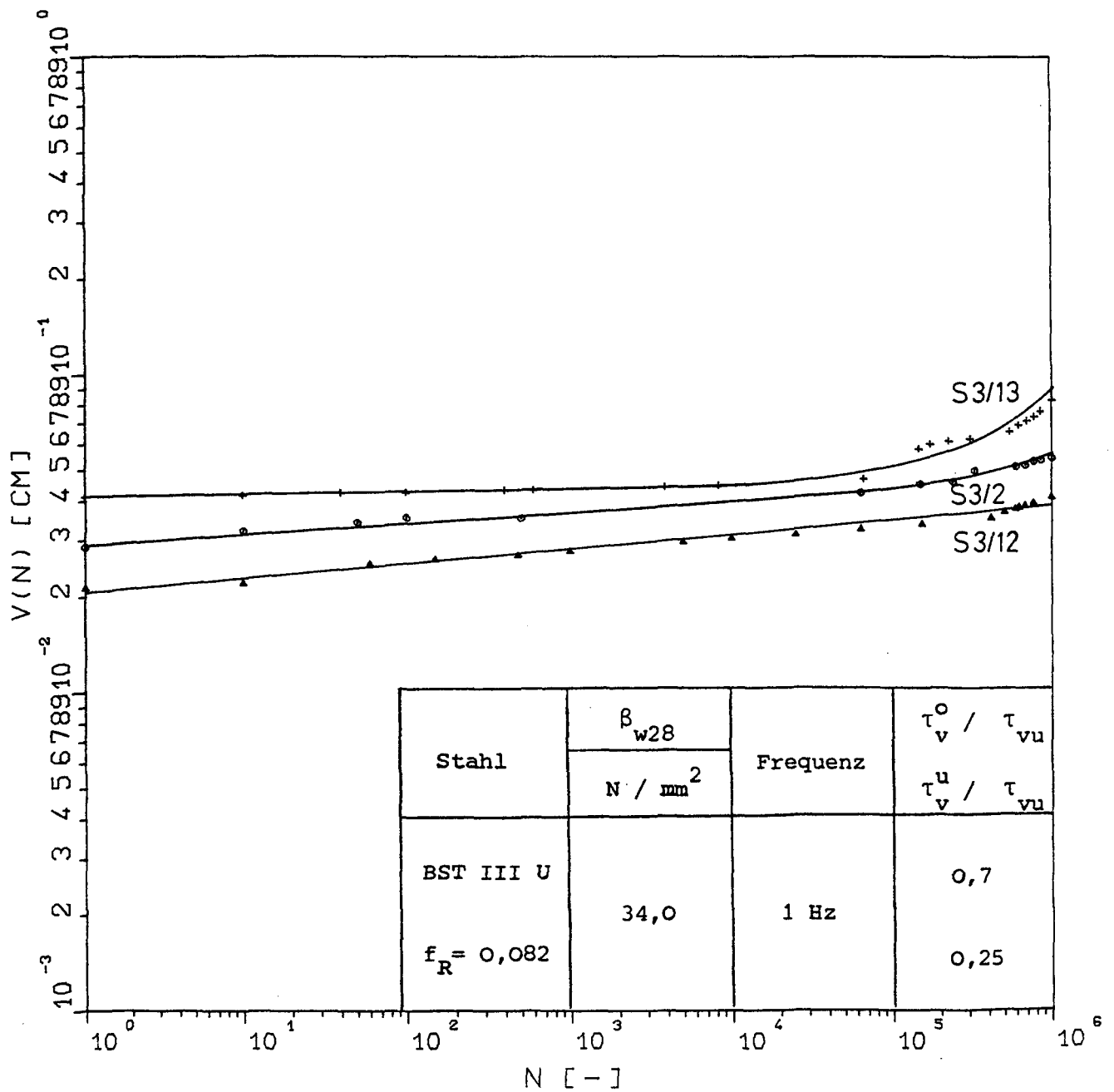
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 2, Körper Nr. 5, 6, 10 und 16)



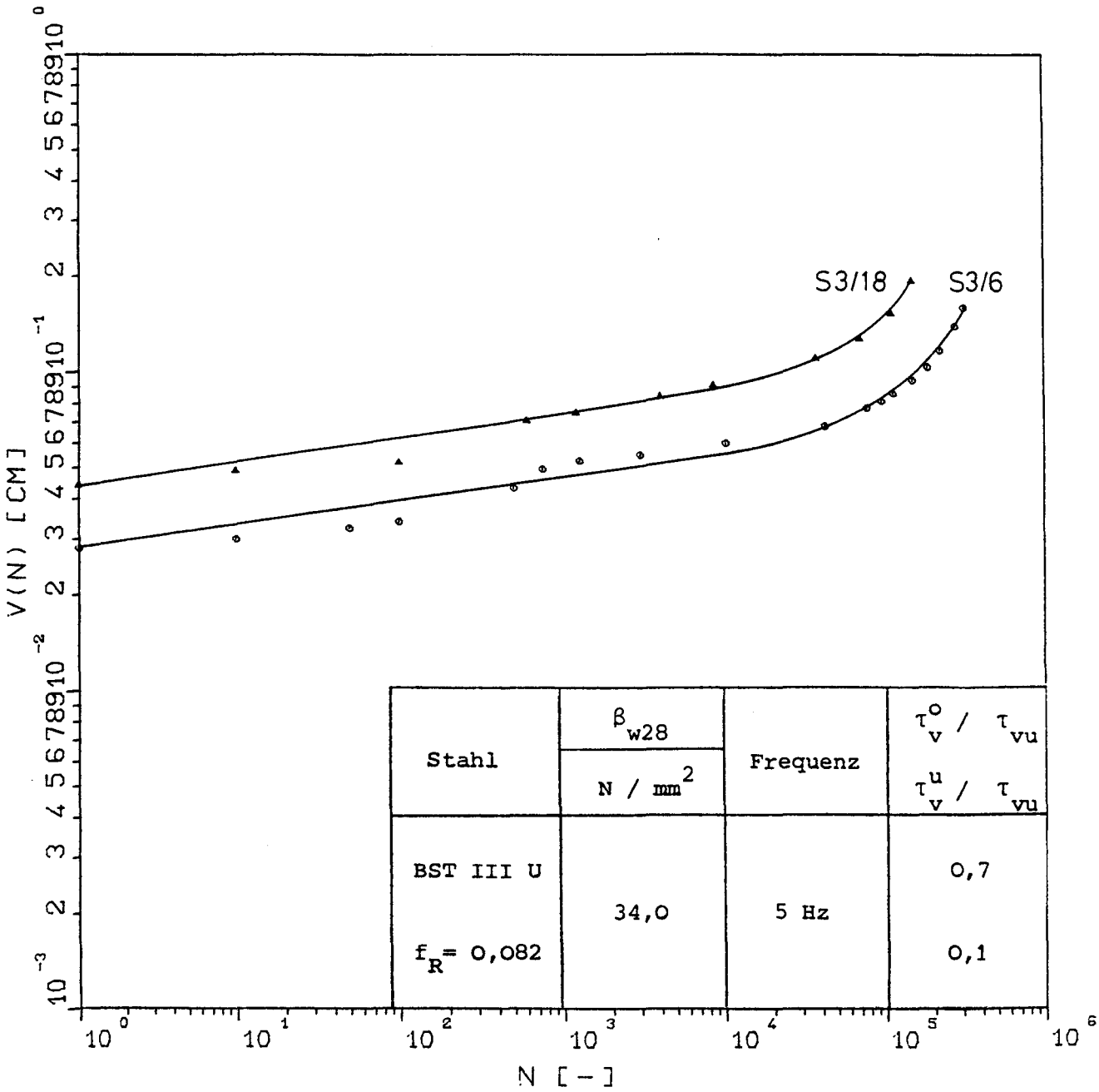
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 2, Körper Nr. 1 und 20)



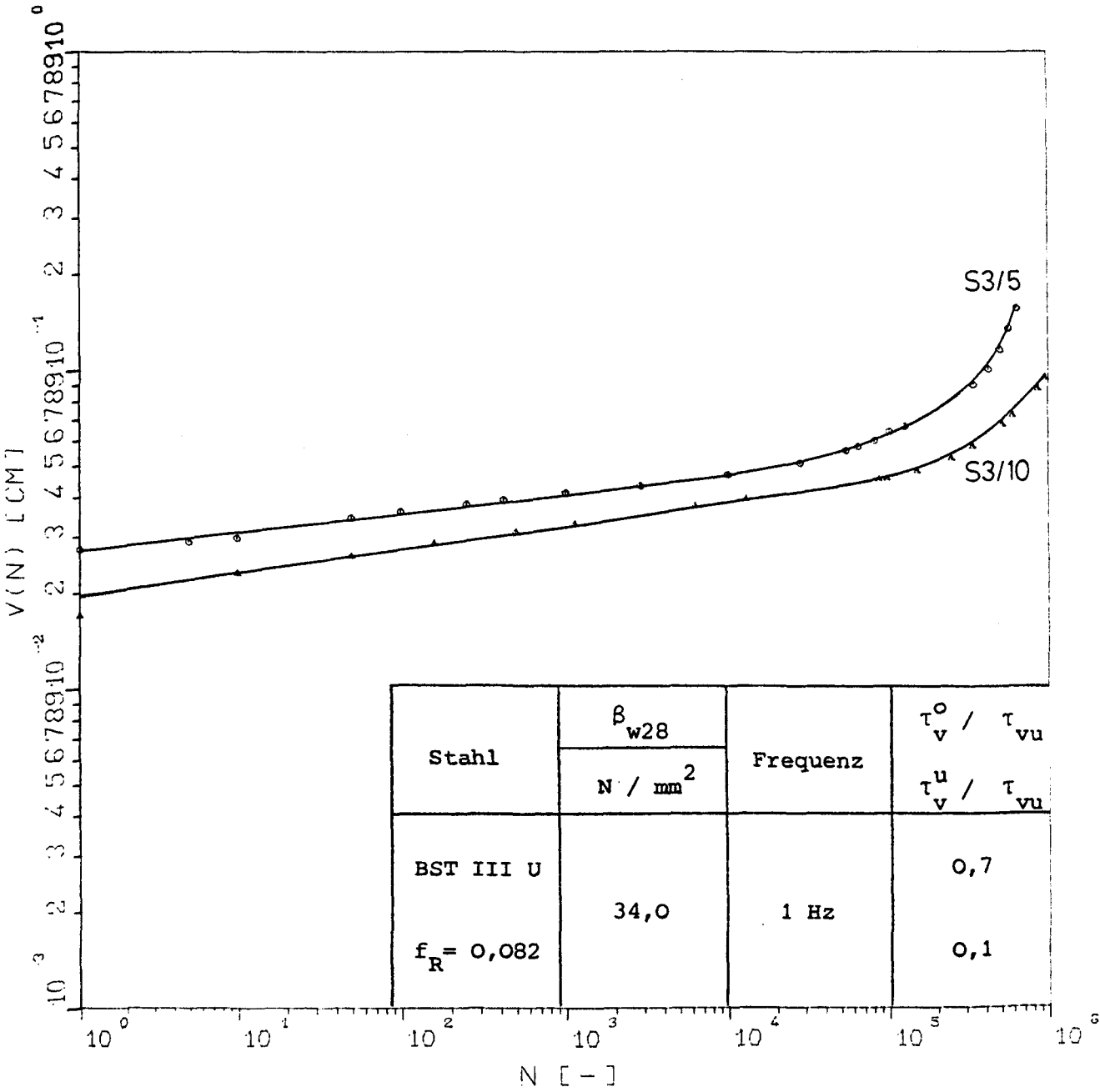
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 3, Körper Nr. 4, 7 und 19)



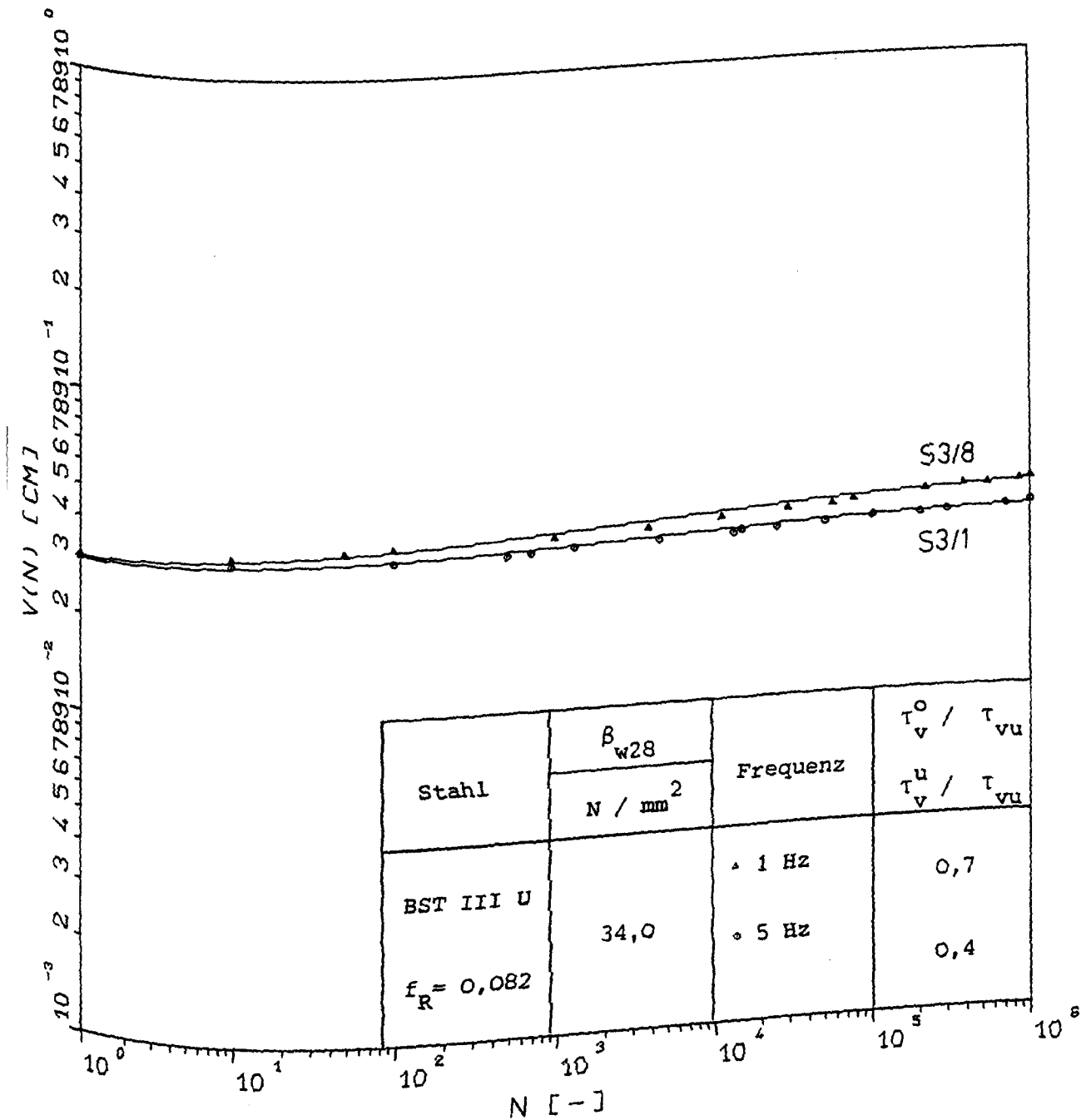
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 3, Körper Nr. 2, 12 und 13)



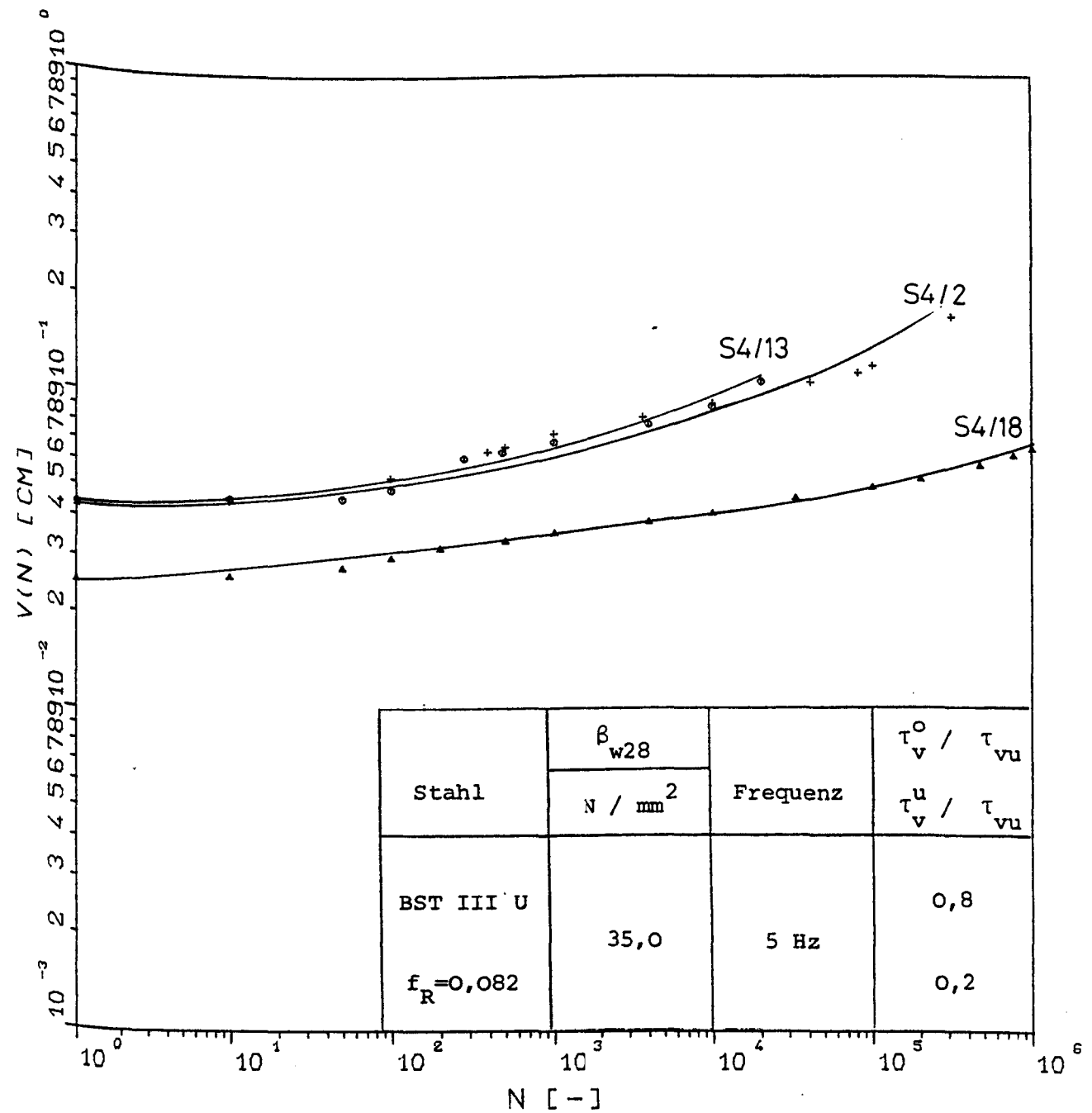
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 3, Körper Nr. 6 und 18)



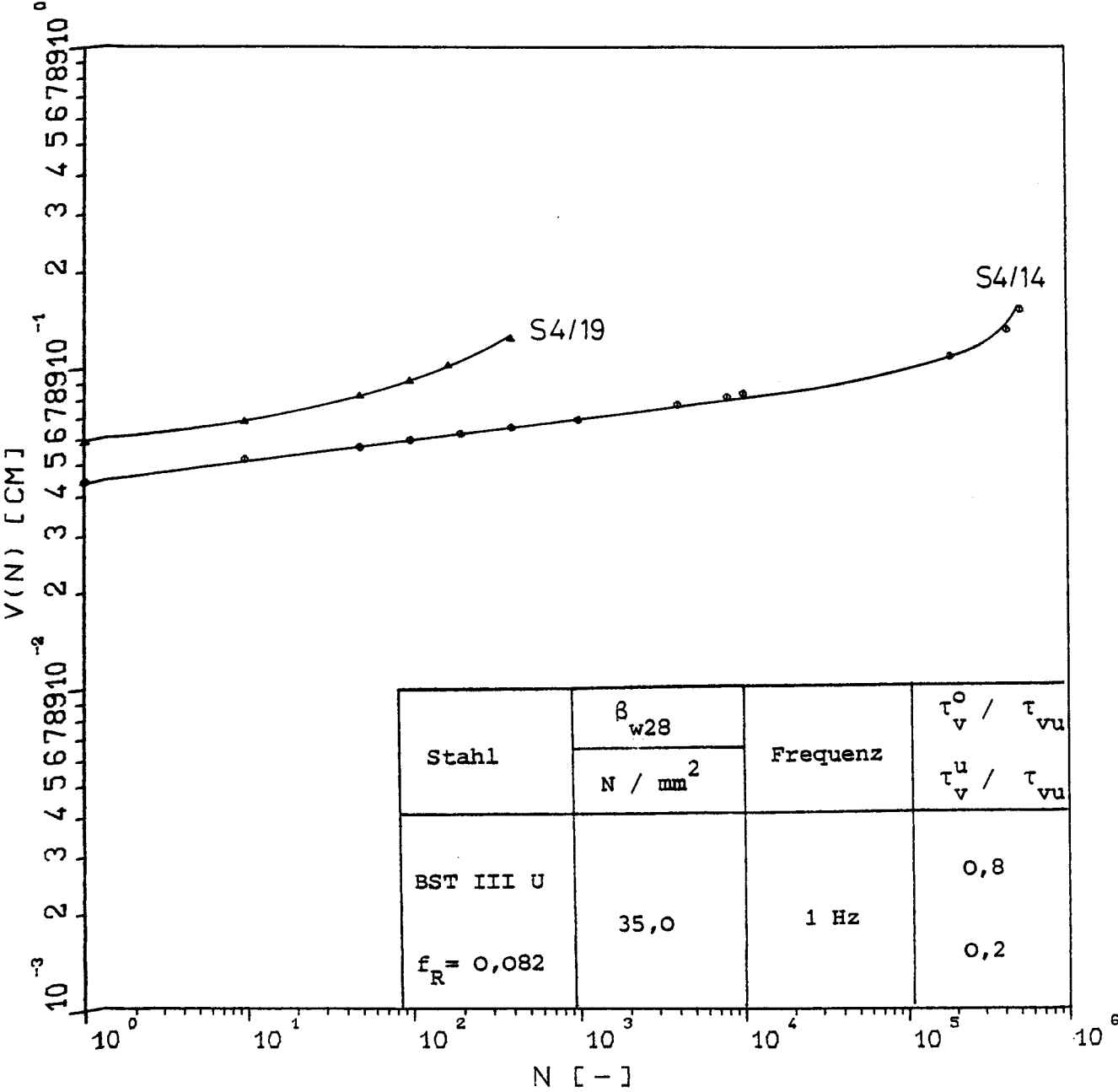
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 3, Körper Nr. 5 und 10)



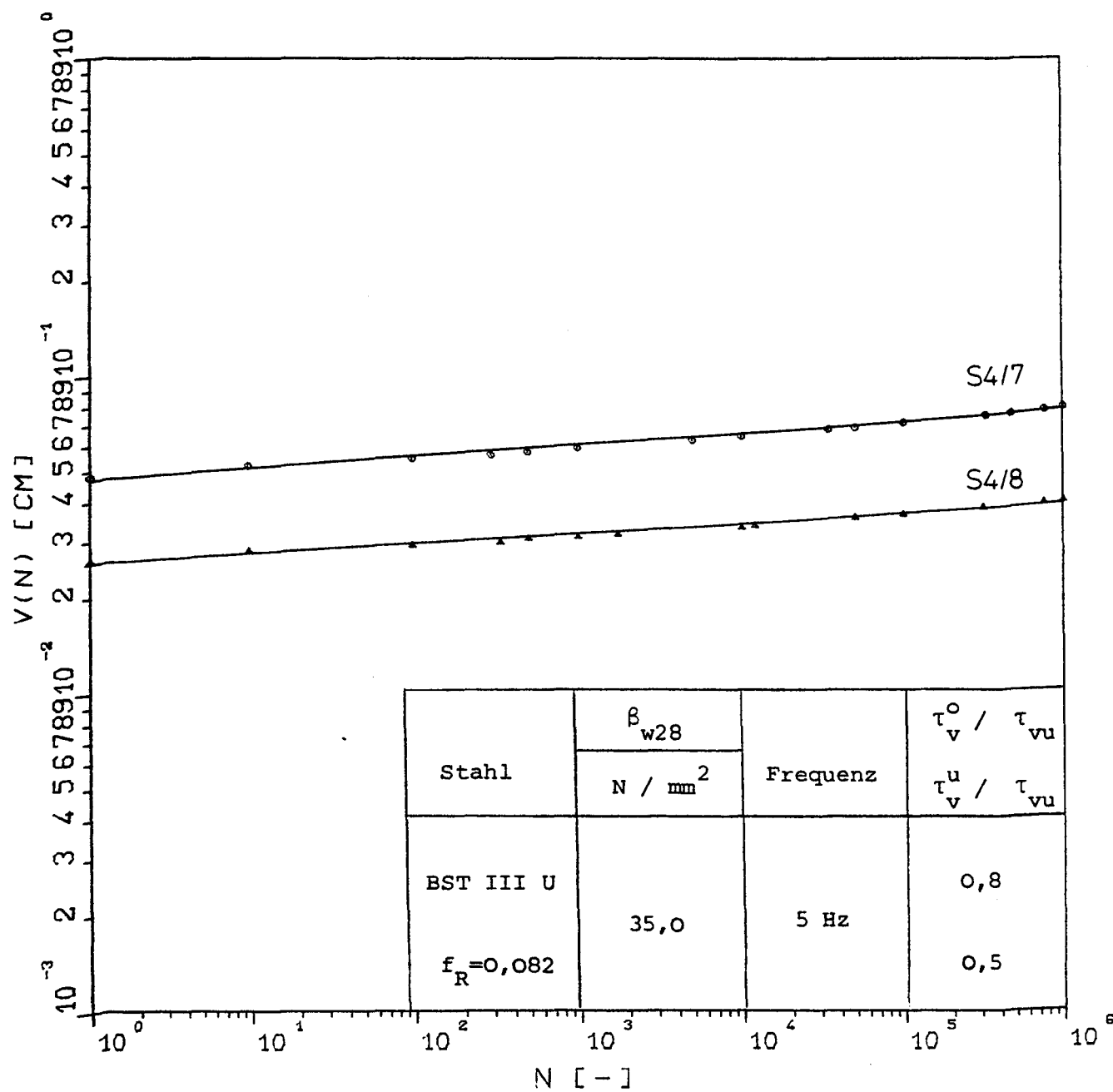
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 3, Körper Nr. 1 und 8)



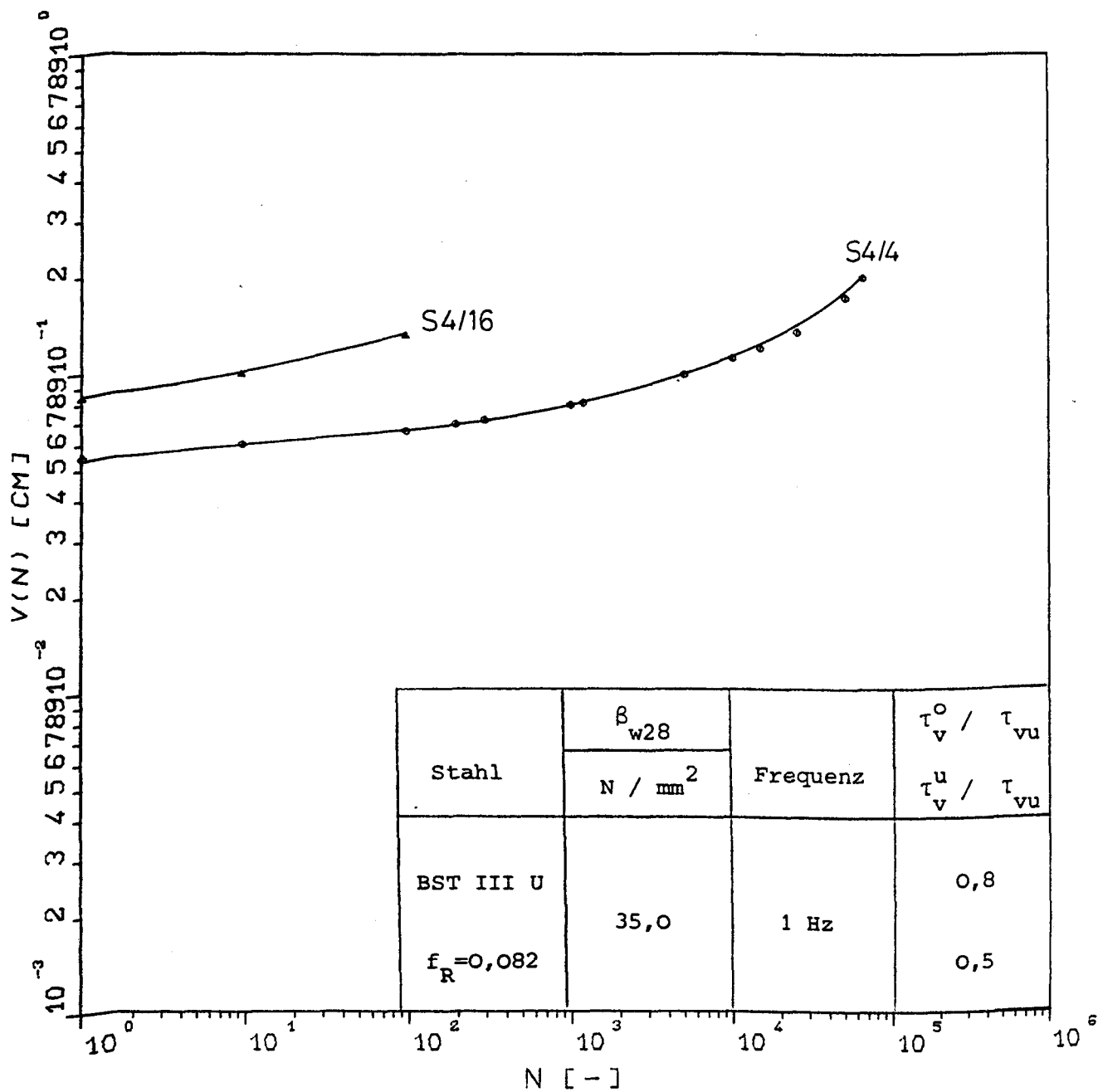
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 2, 13 und 18)



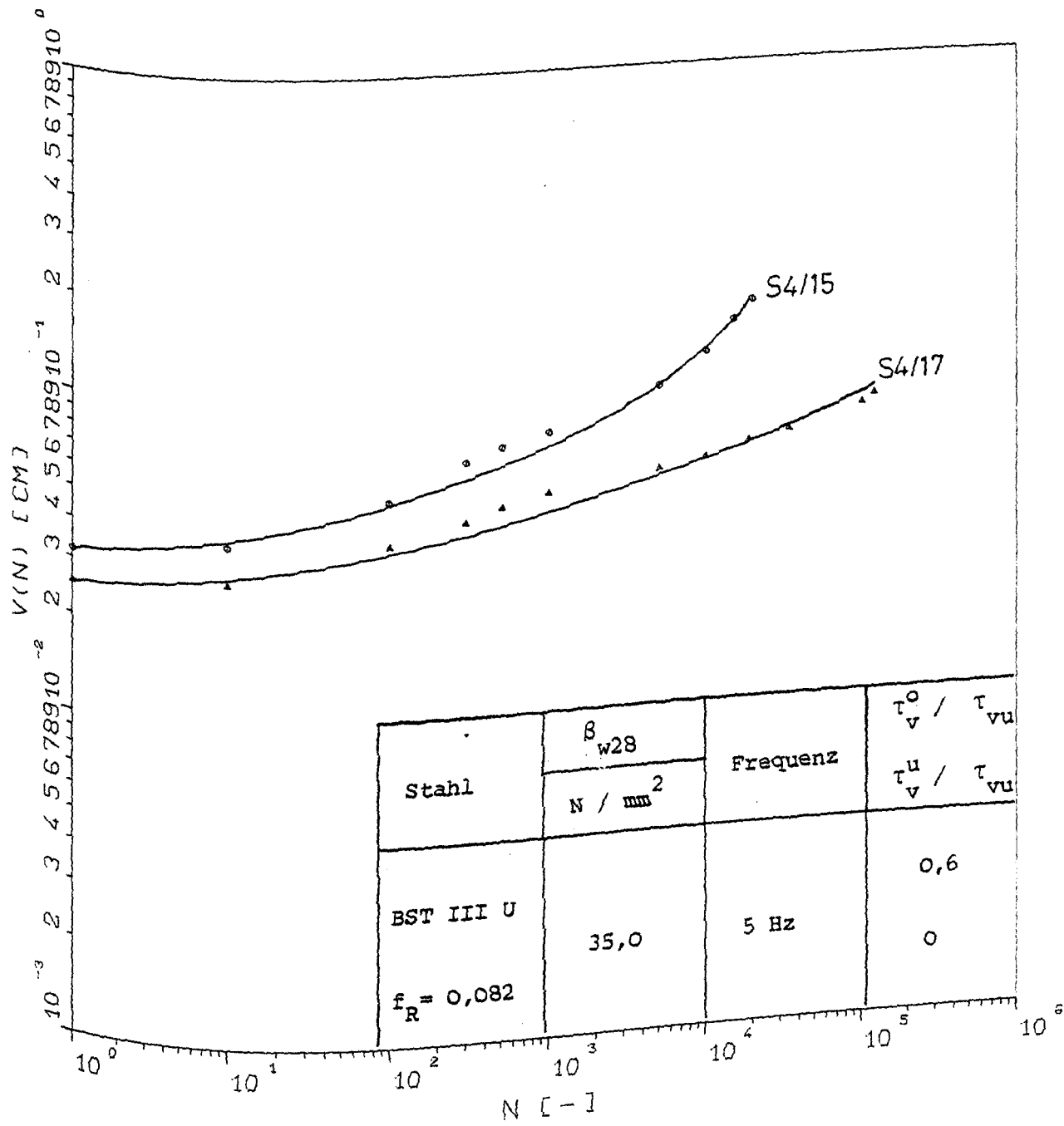
verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 14 und 19)



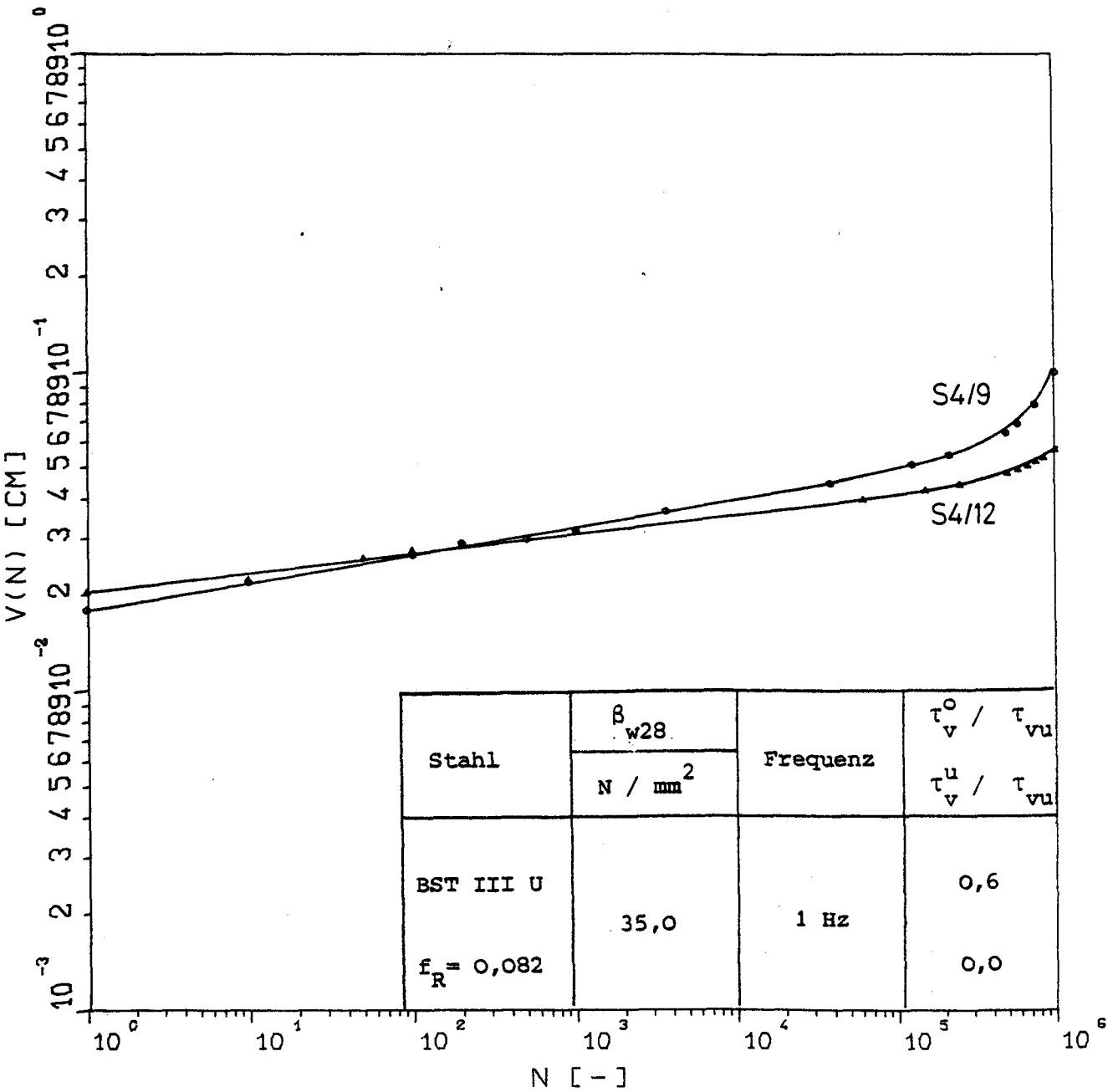
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 7 und 8)



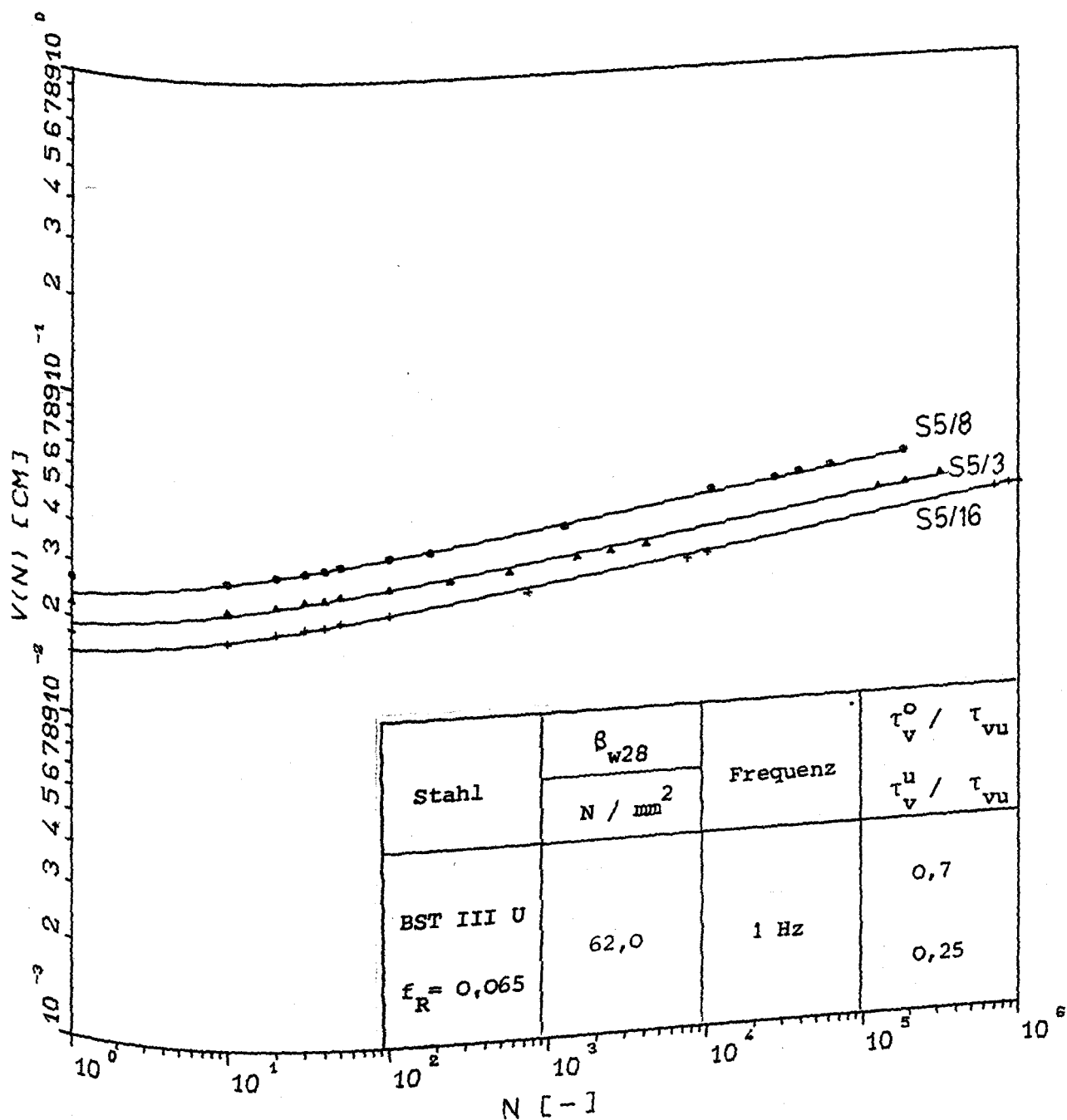
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 4 und 16)



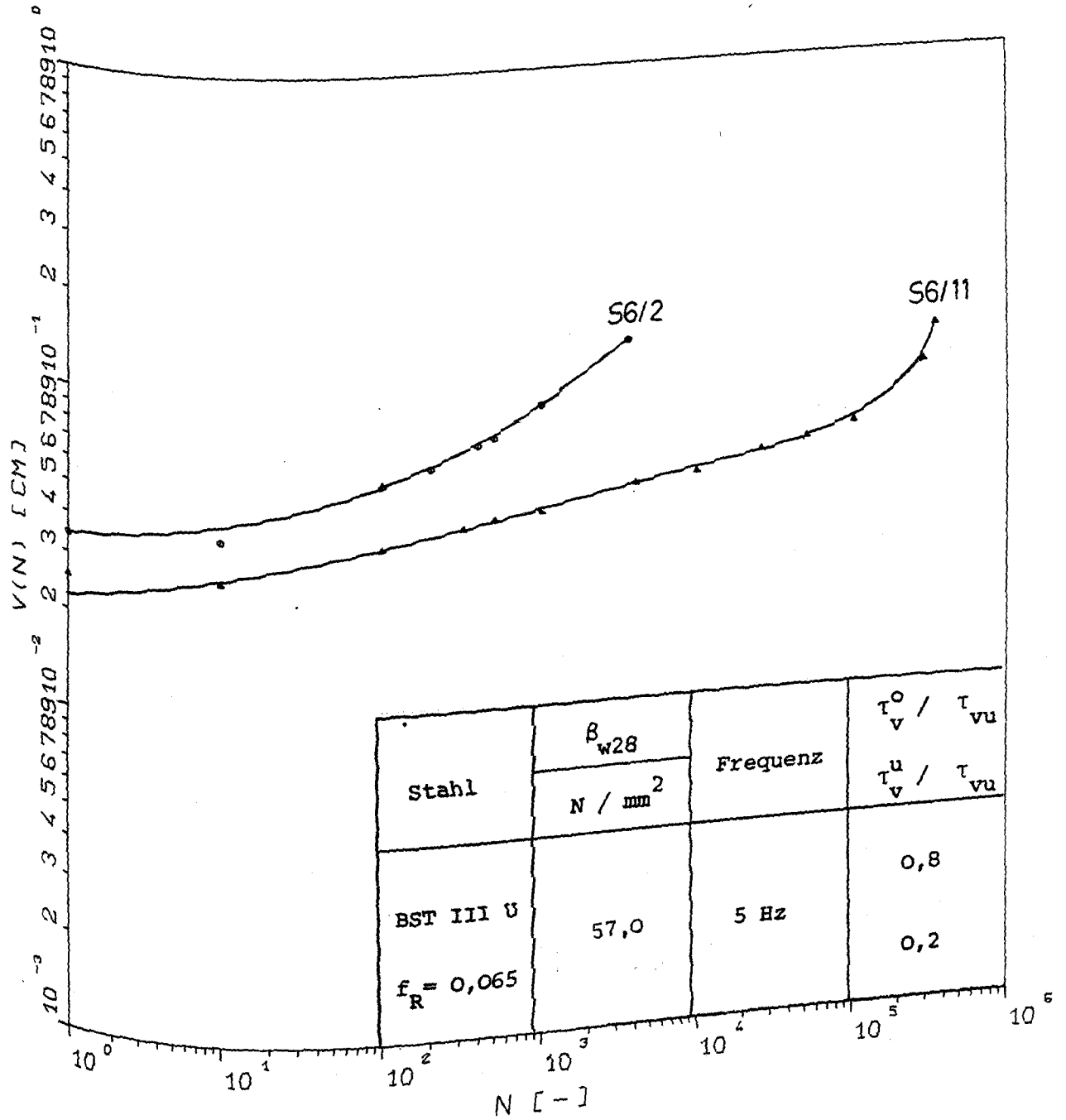
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 15 und 17)



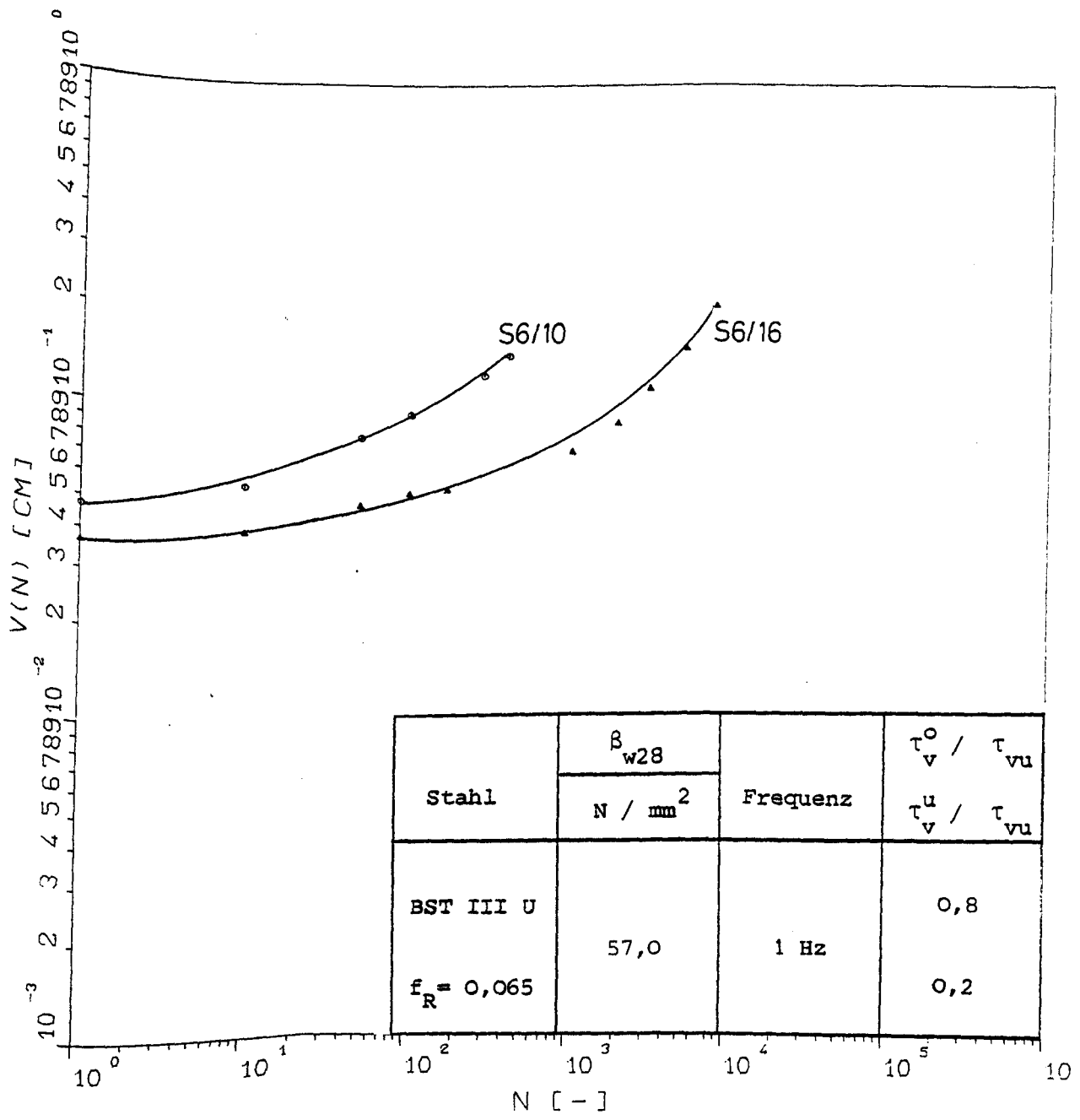
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 4, Körper Nr. 9 und 12)



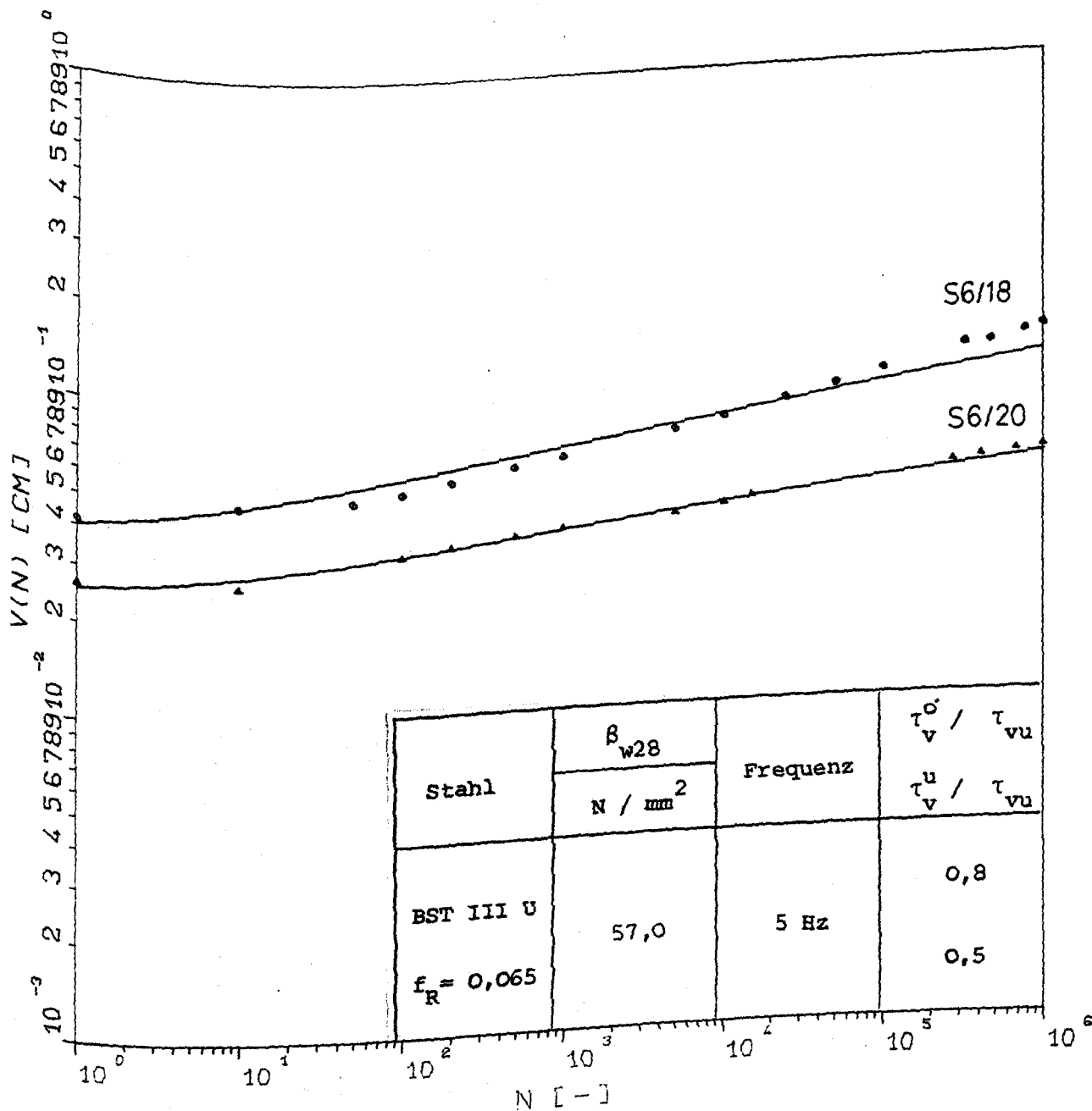
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 5, Körper Nr. 3, 8 und 16)



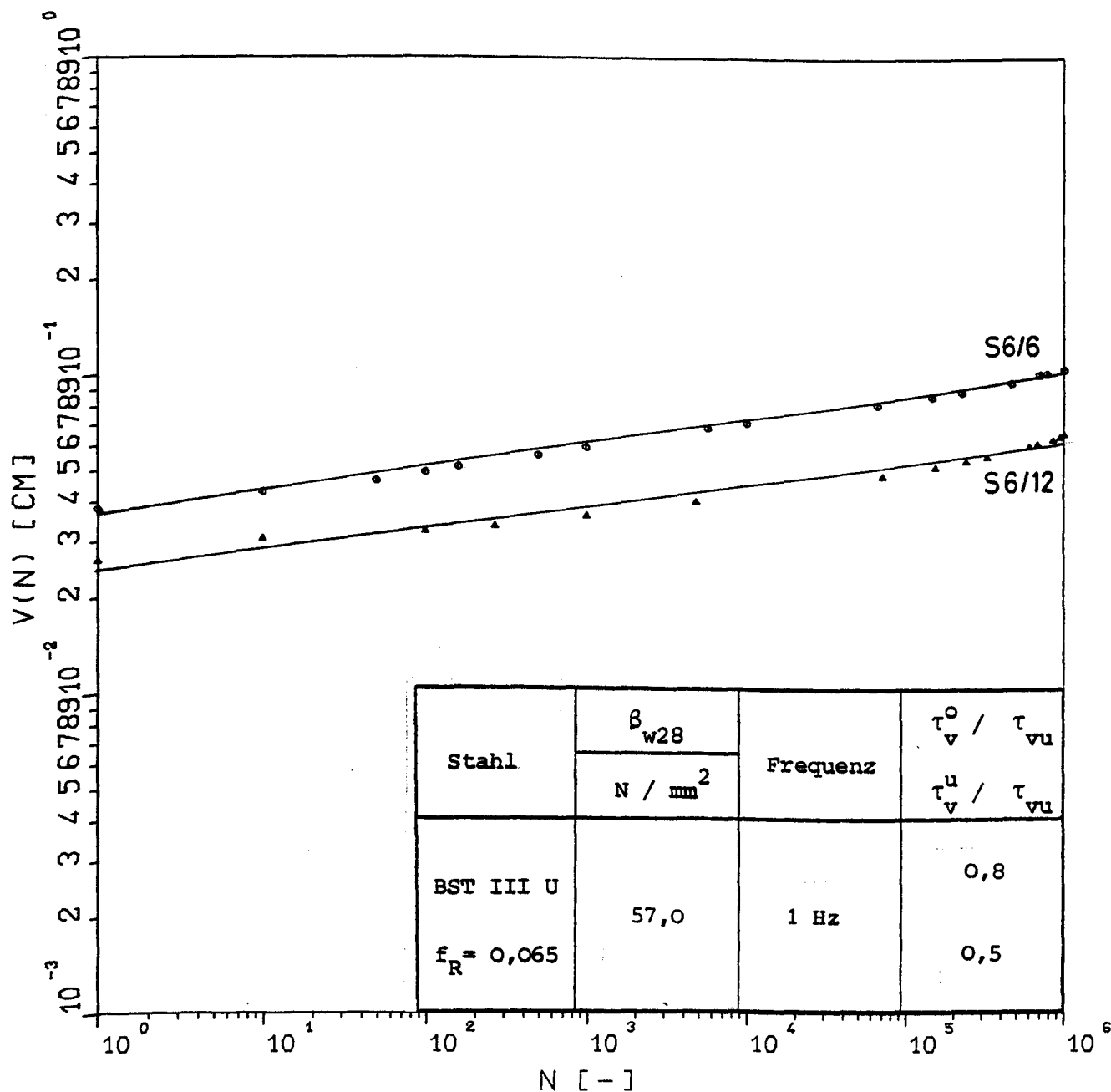
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 2 und 11)



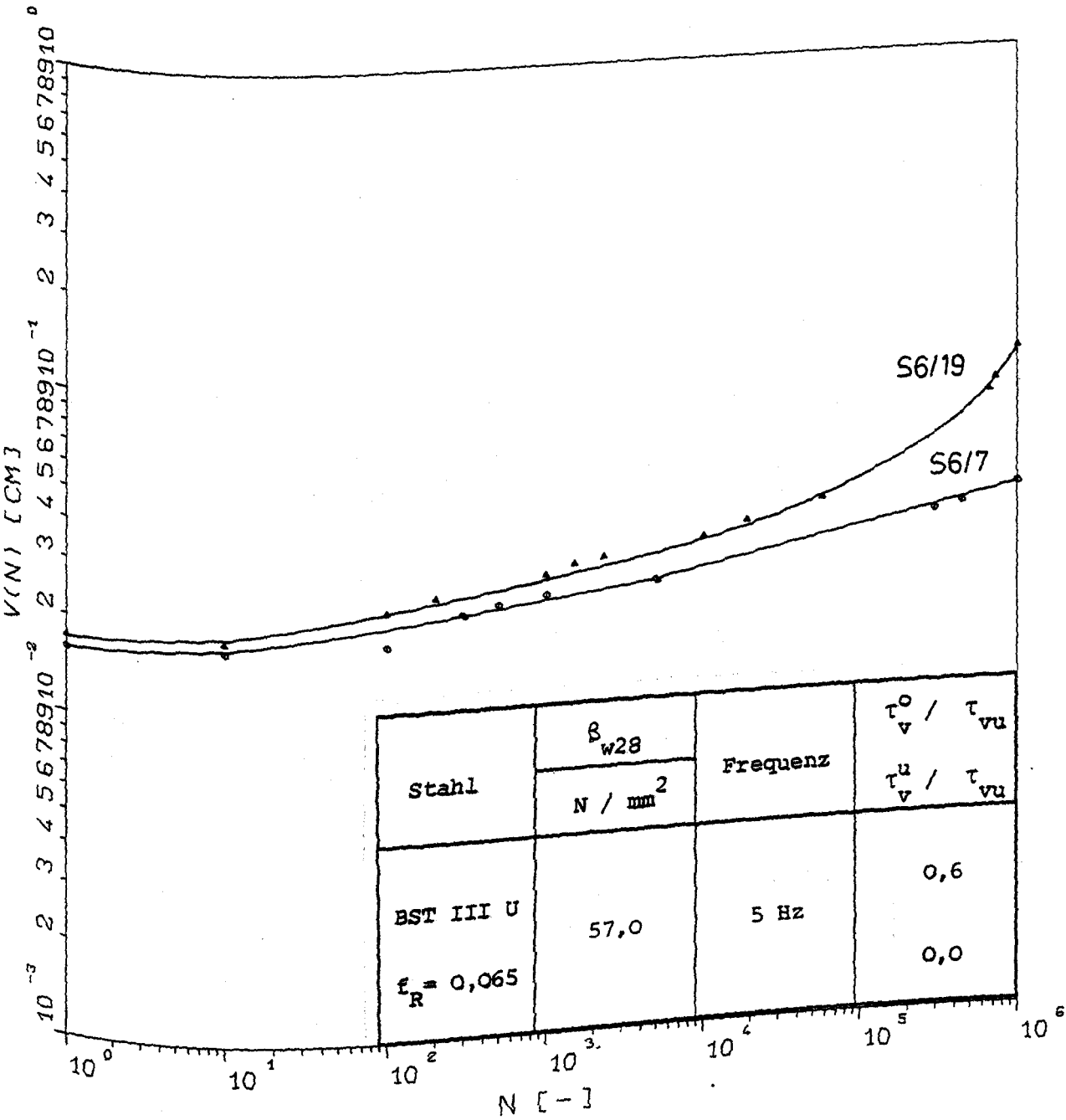
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 10 und 16)



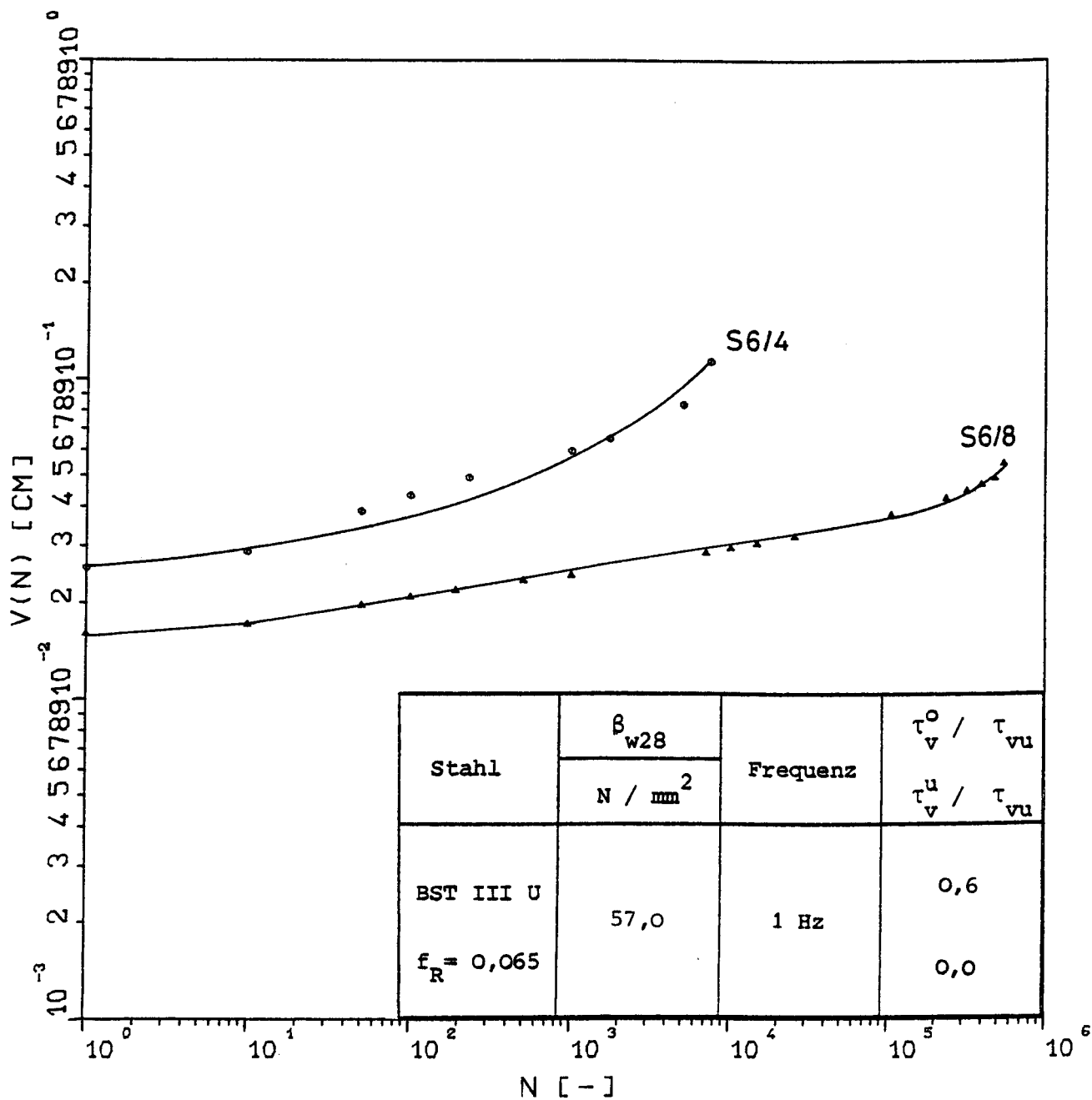
Verschiebungszunahme in Anhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 18 und 20)



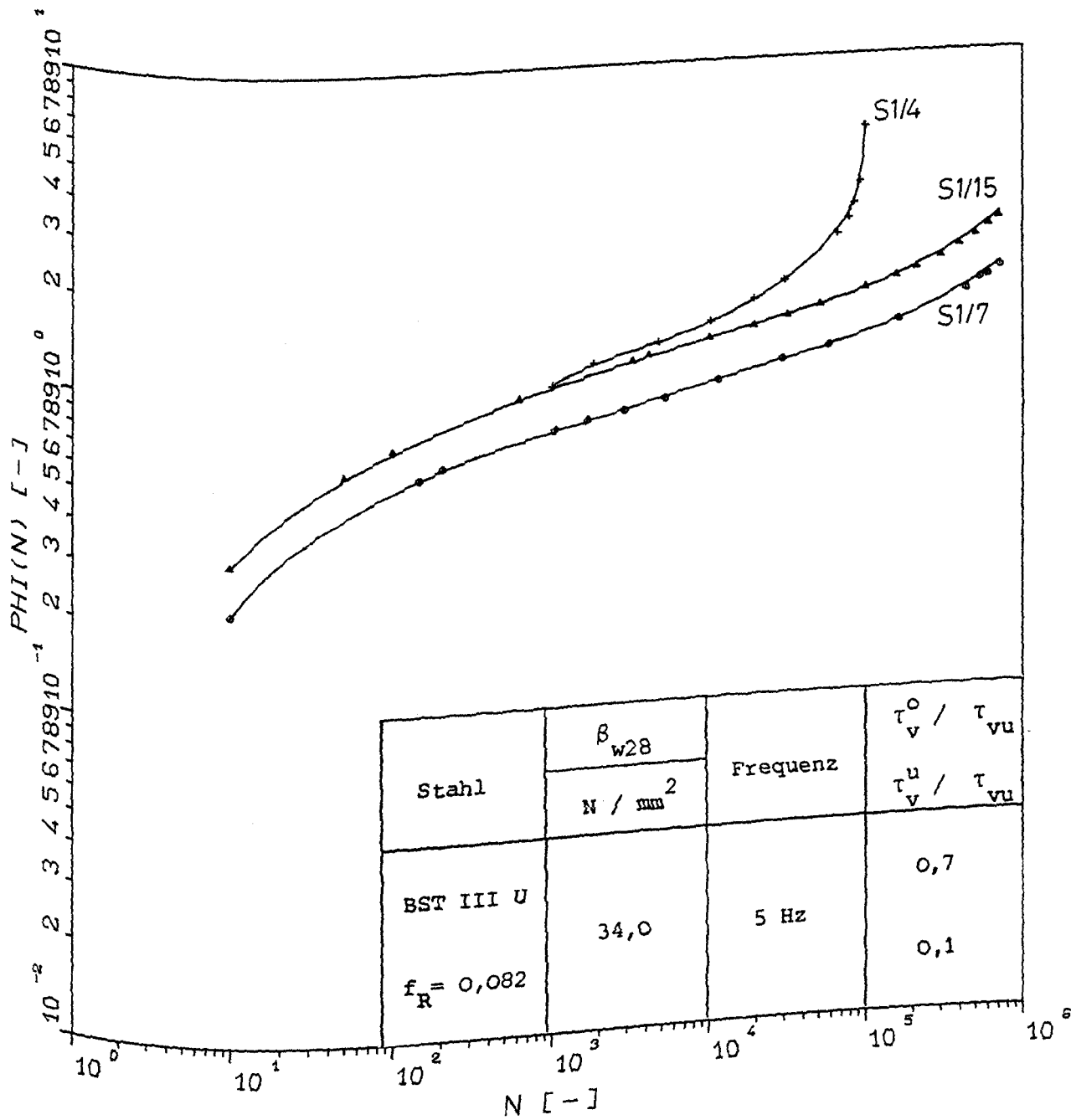
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 6 und 12)



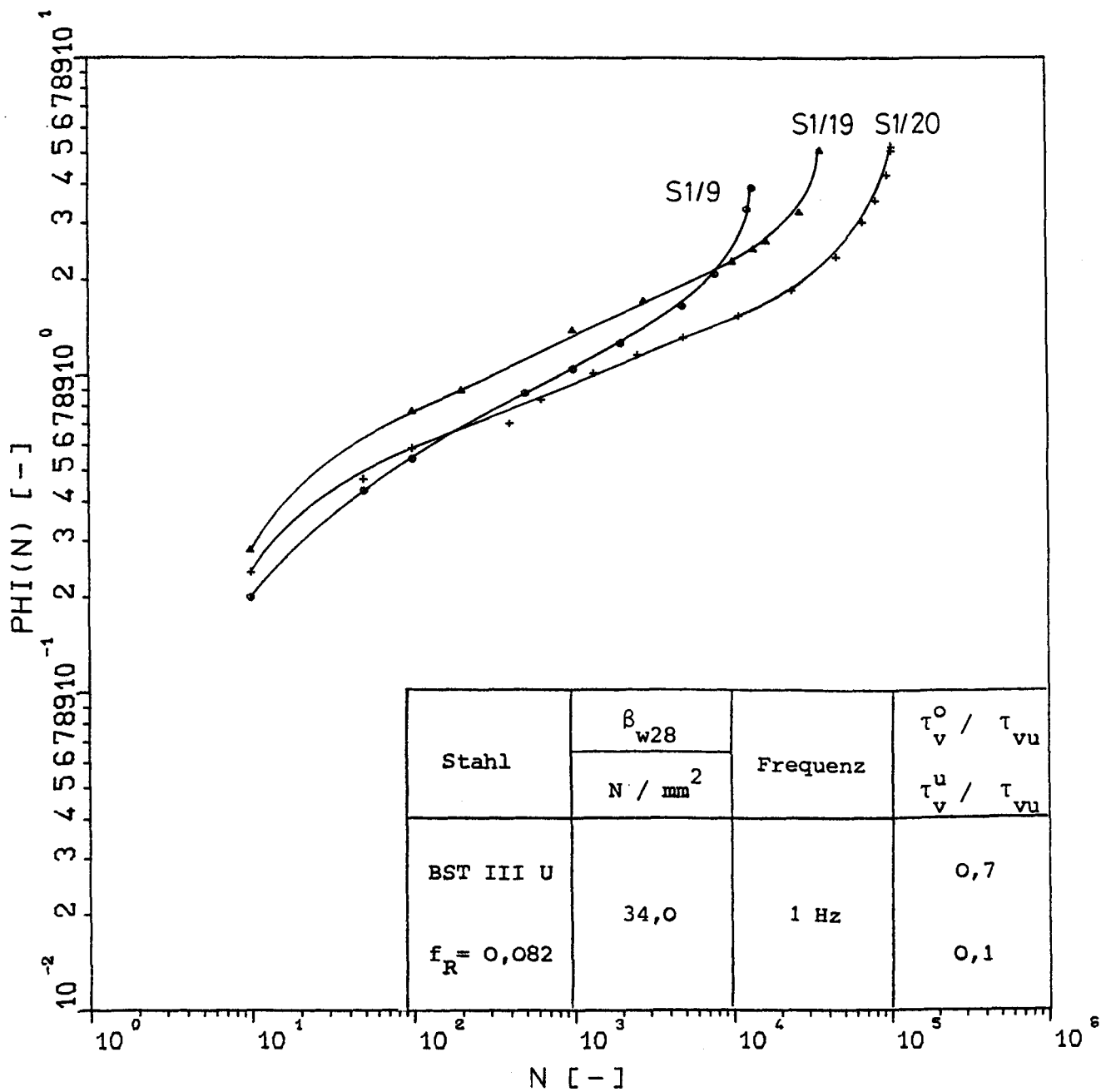
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 7 und 19)



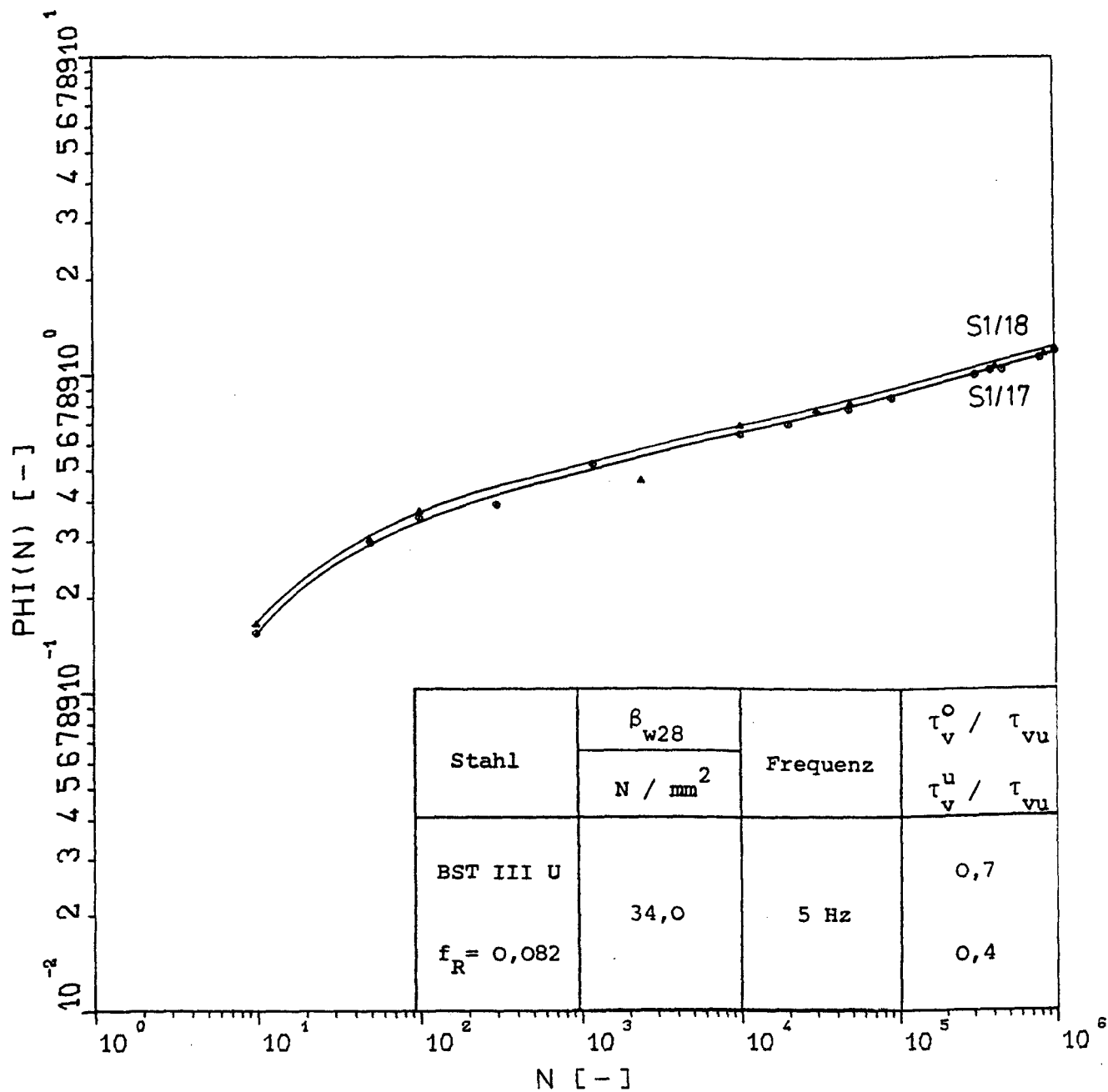
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N
(Serie 6, Körper Nr. 4 und 8)



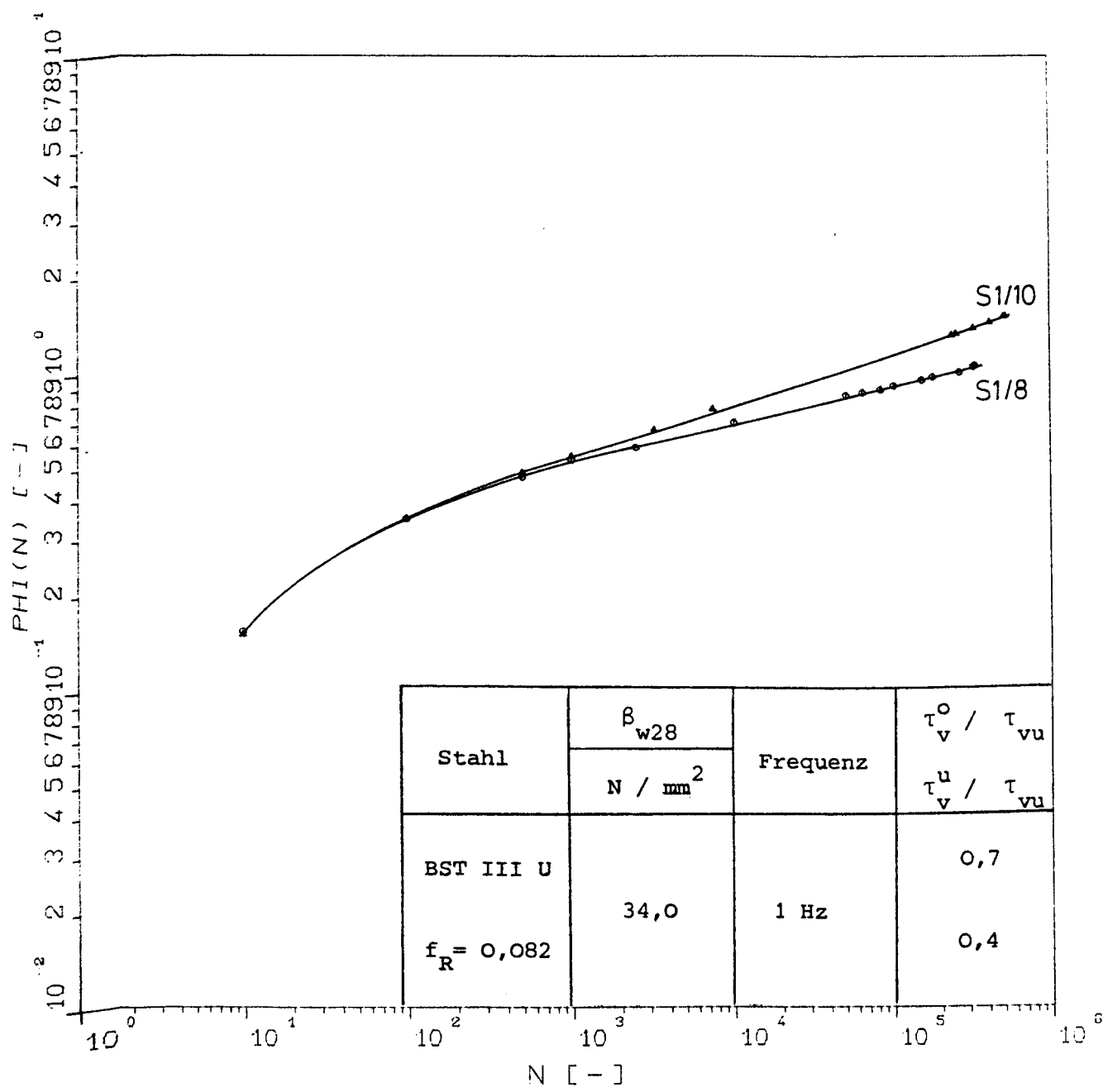
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 1, Körper Nr. 4, 7 und 15)



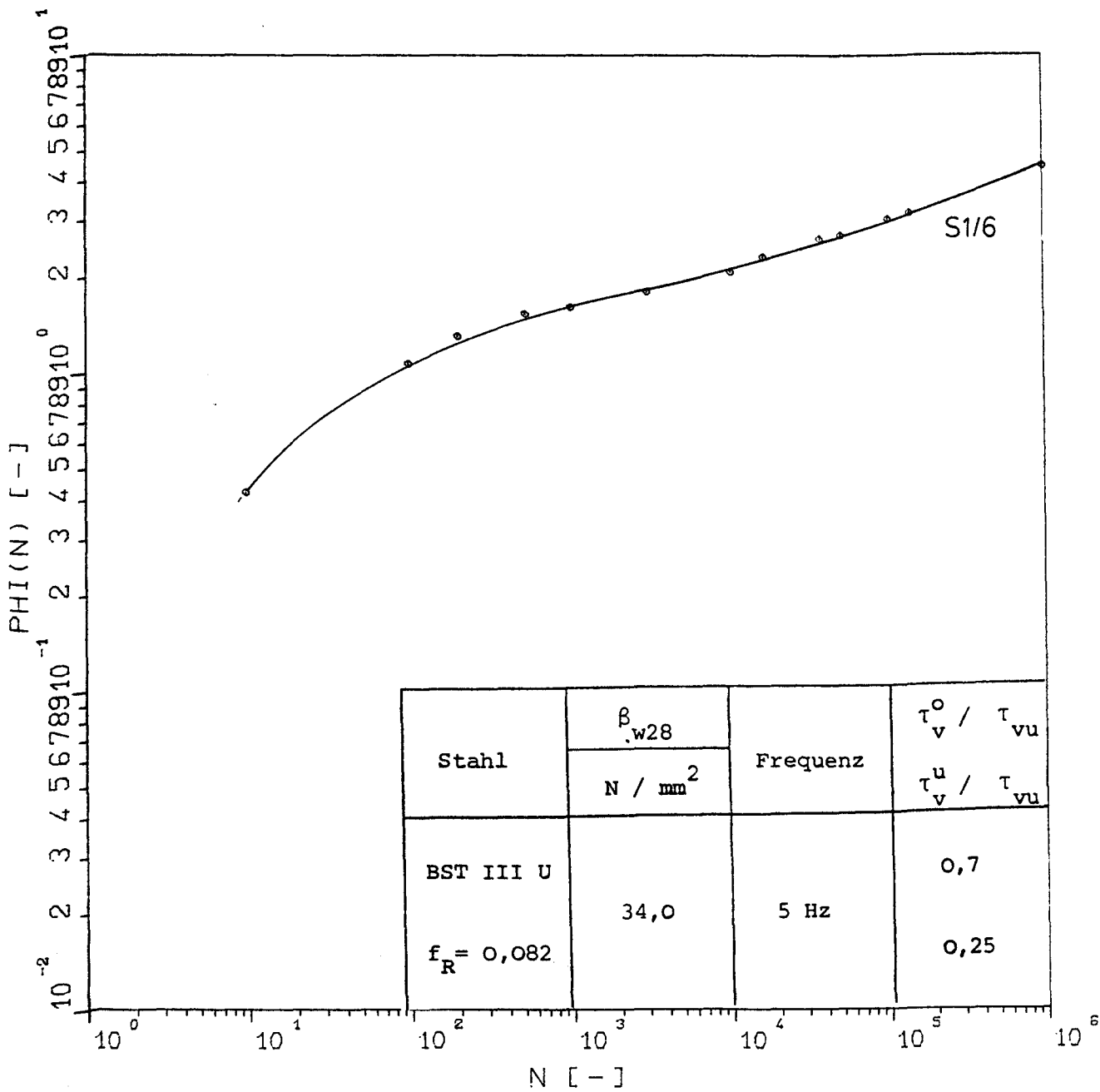
Kriechzahlen in der Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 1, Körper Nr. 9, 19 und 20)



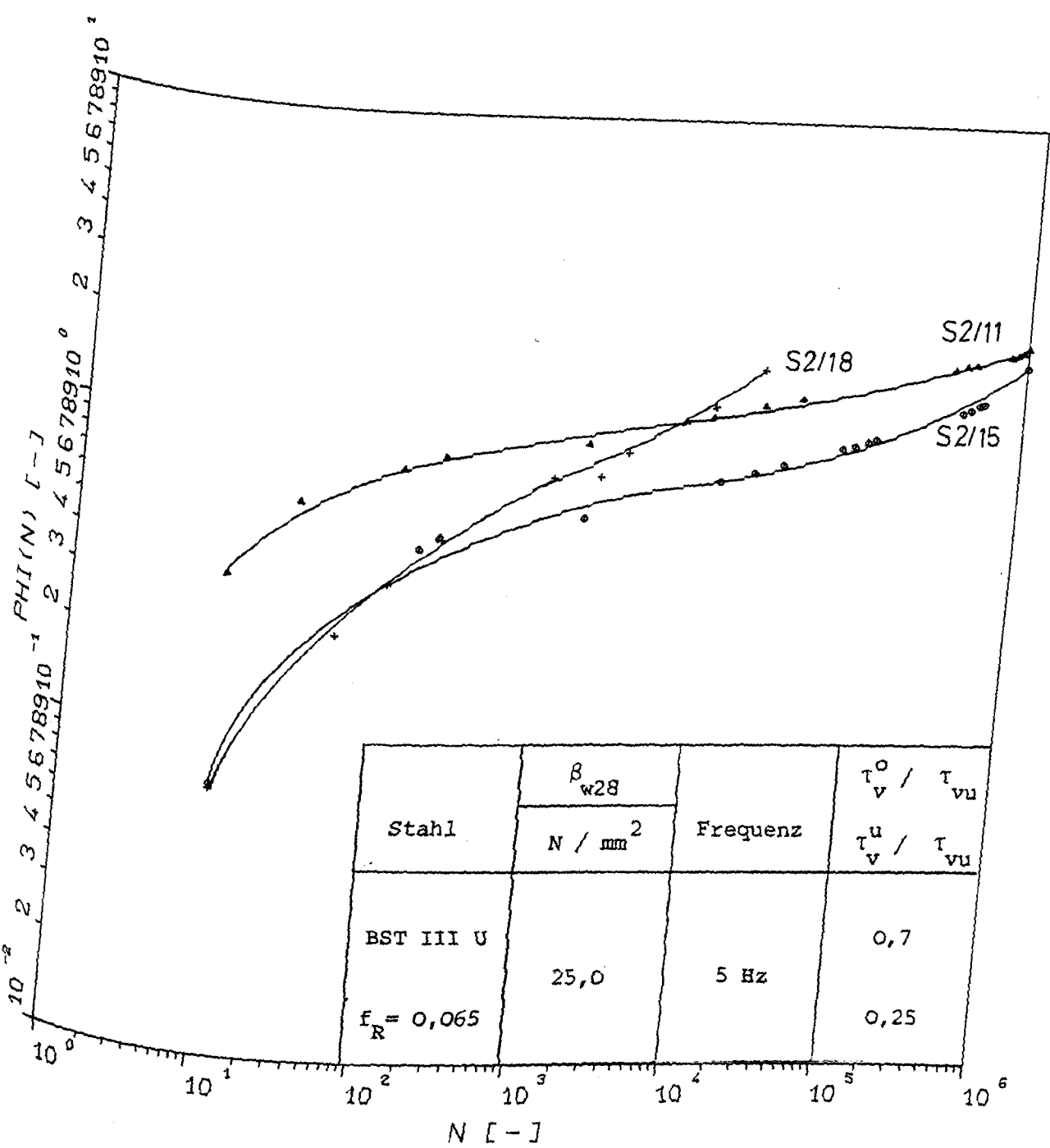
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 1, Körper Nr. 17 und 18)



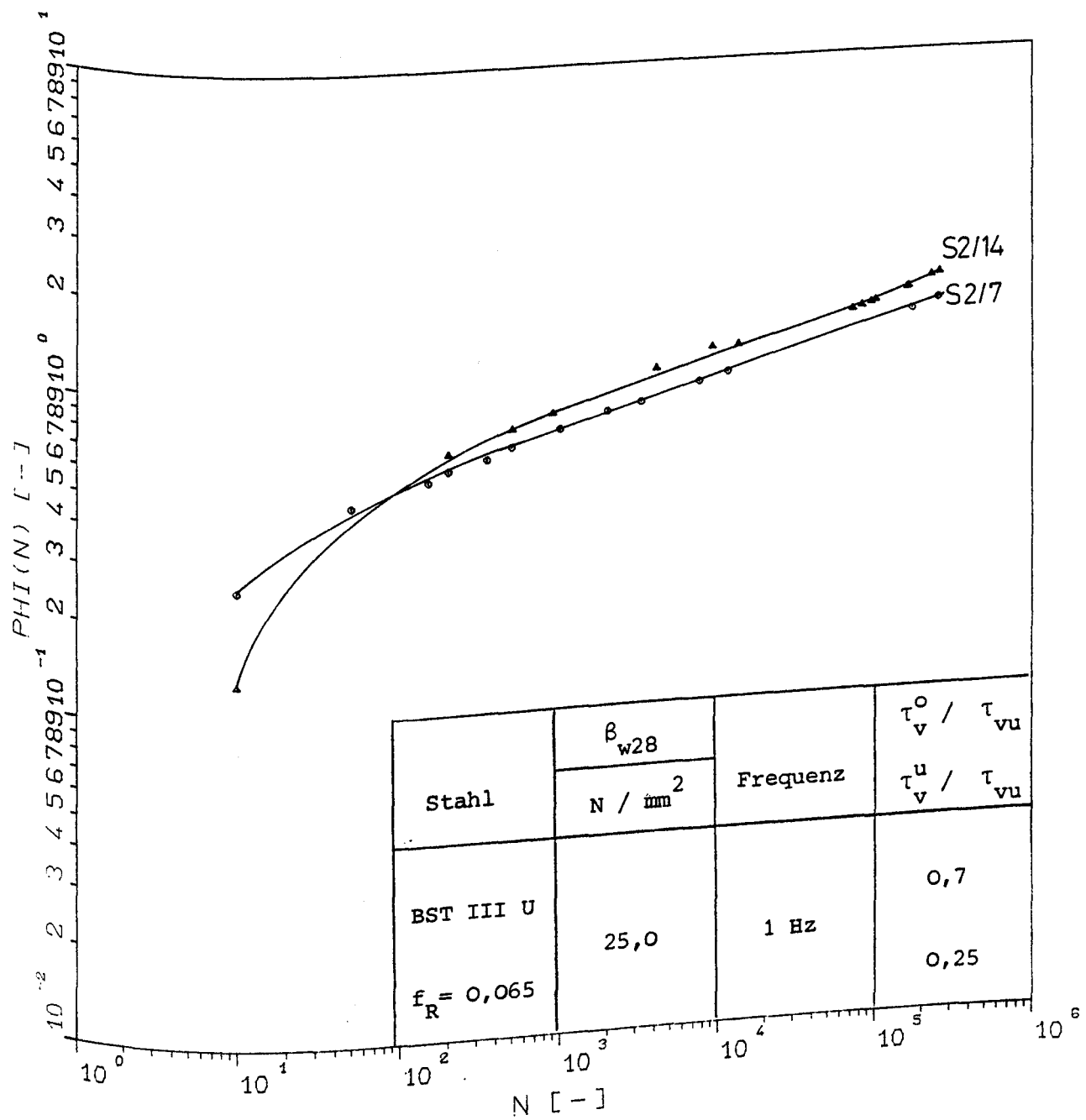
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 1, Körper Nr. 8 und 10)



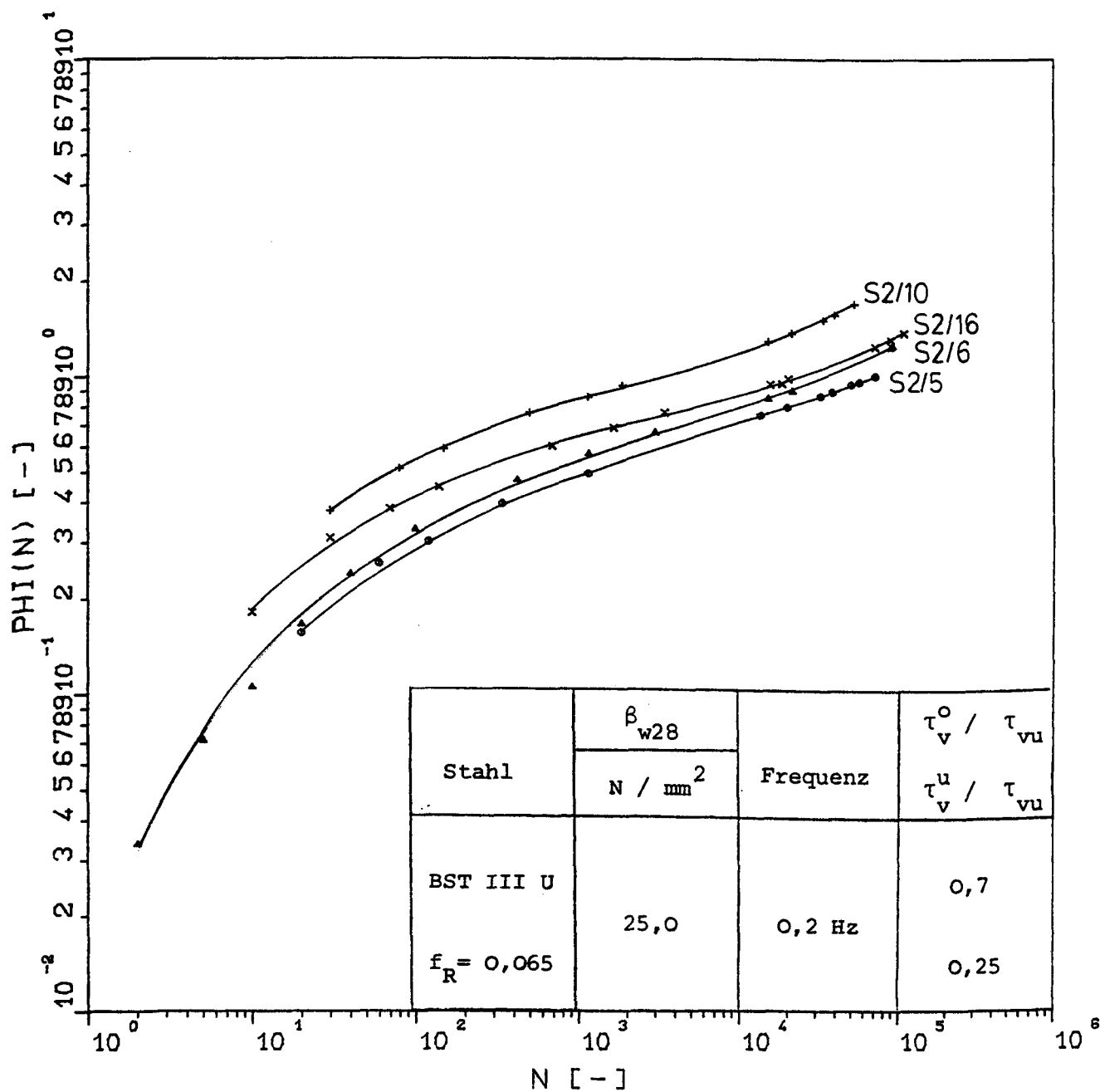
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 1, Körper Nr. 6)



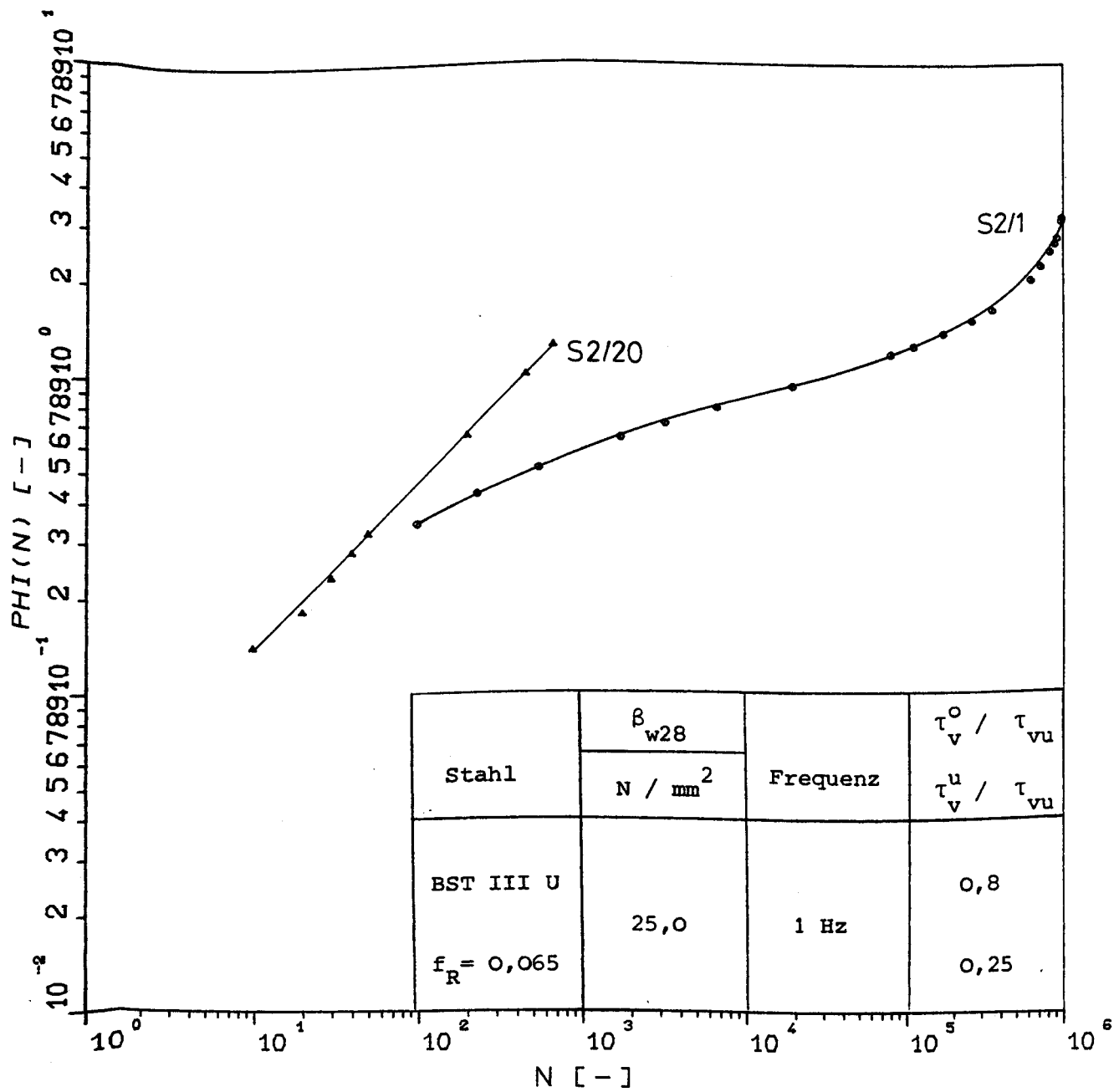
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 2, Körper Nr. 11, 15 und 18)



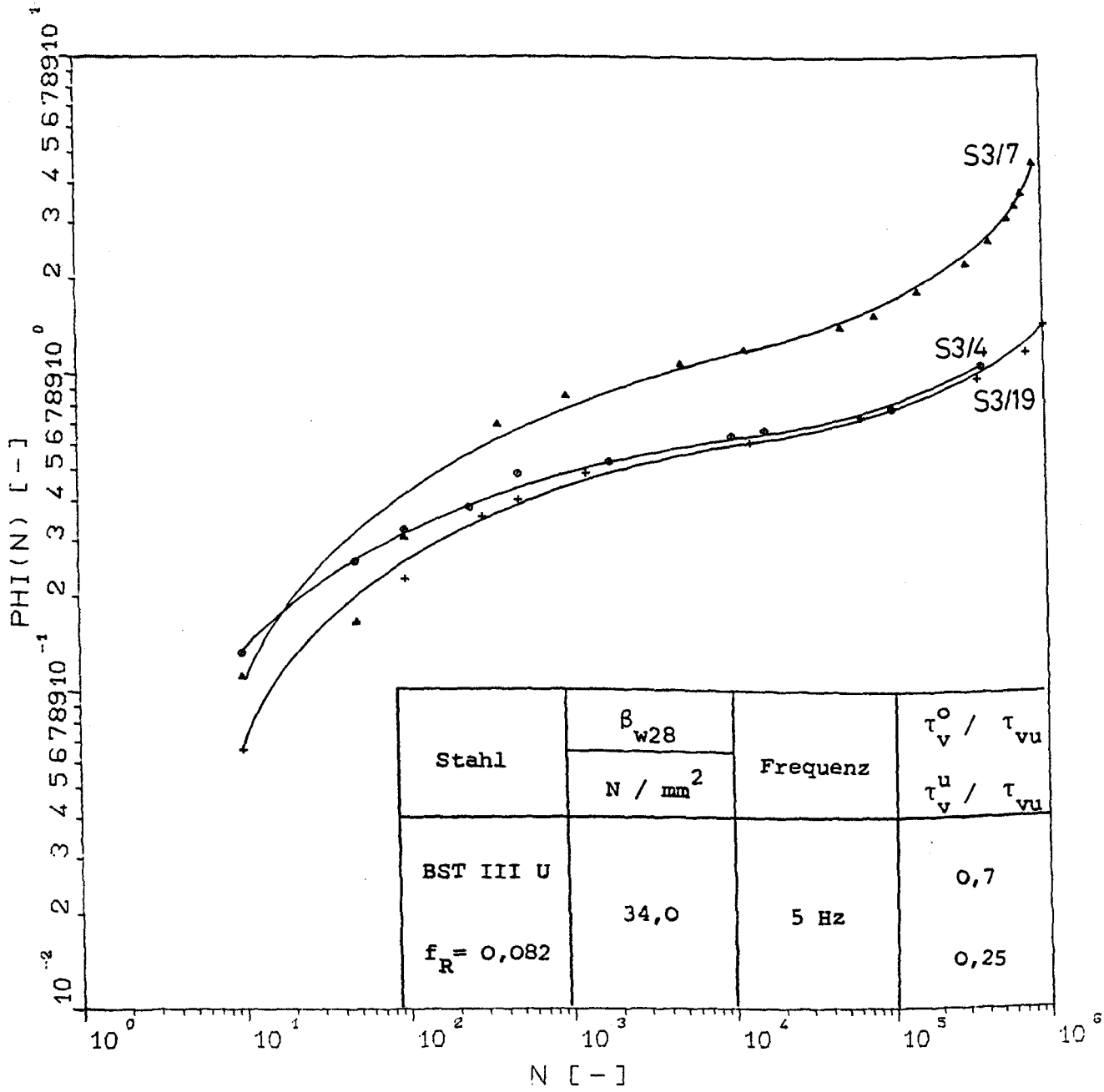
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 2, Körper Nr. 7 und 14)



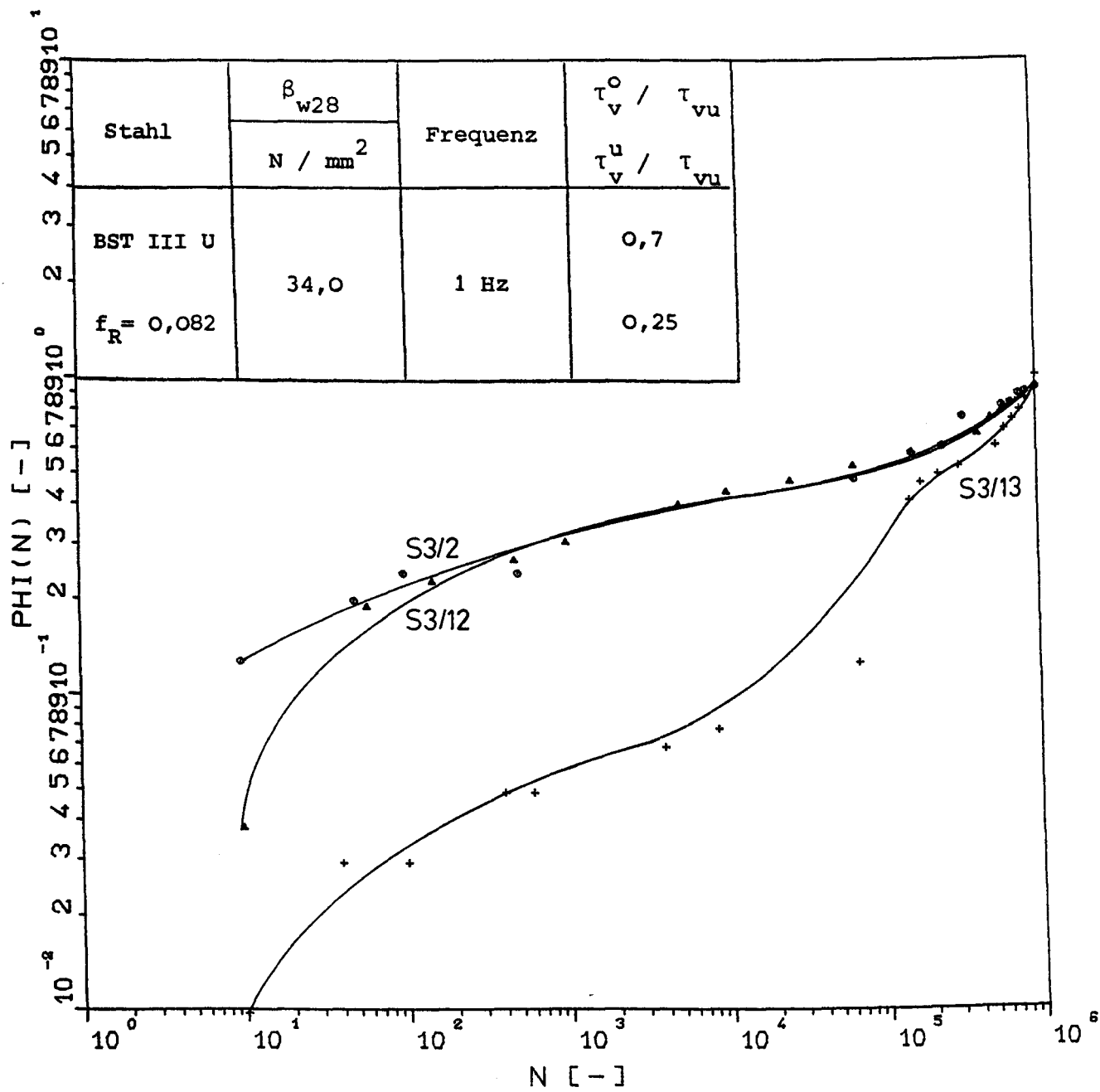
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 2, Körper Nr. 5, 6, 10 und 16)



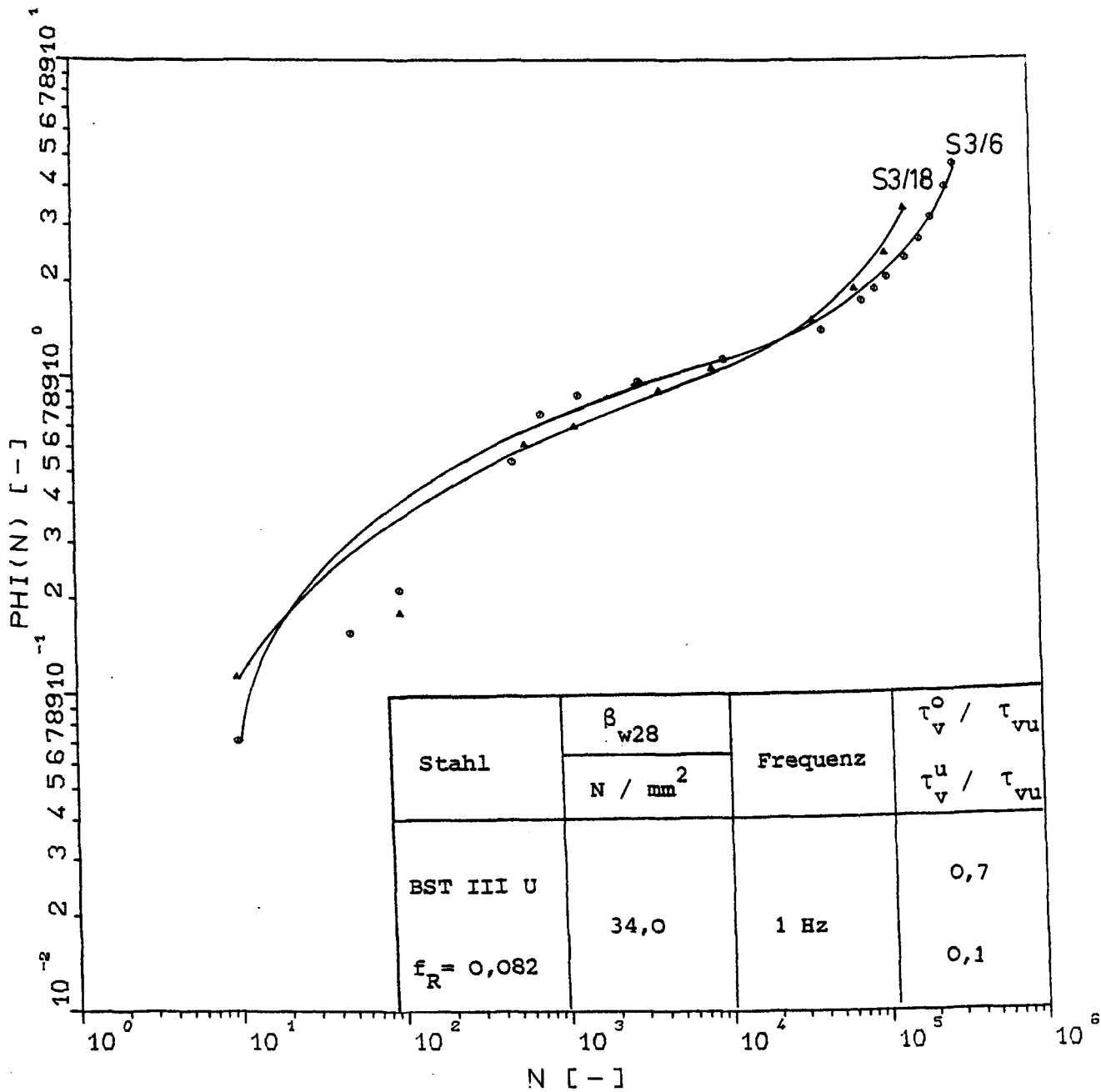
Kriechzahlen in der Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 2, Körper Nr. 1 und 20)



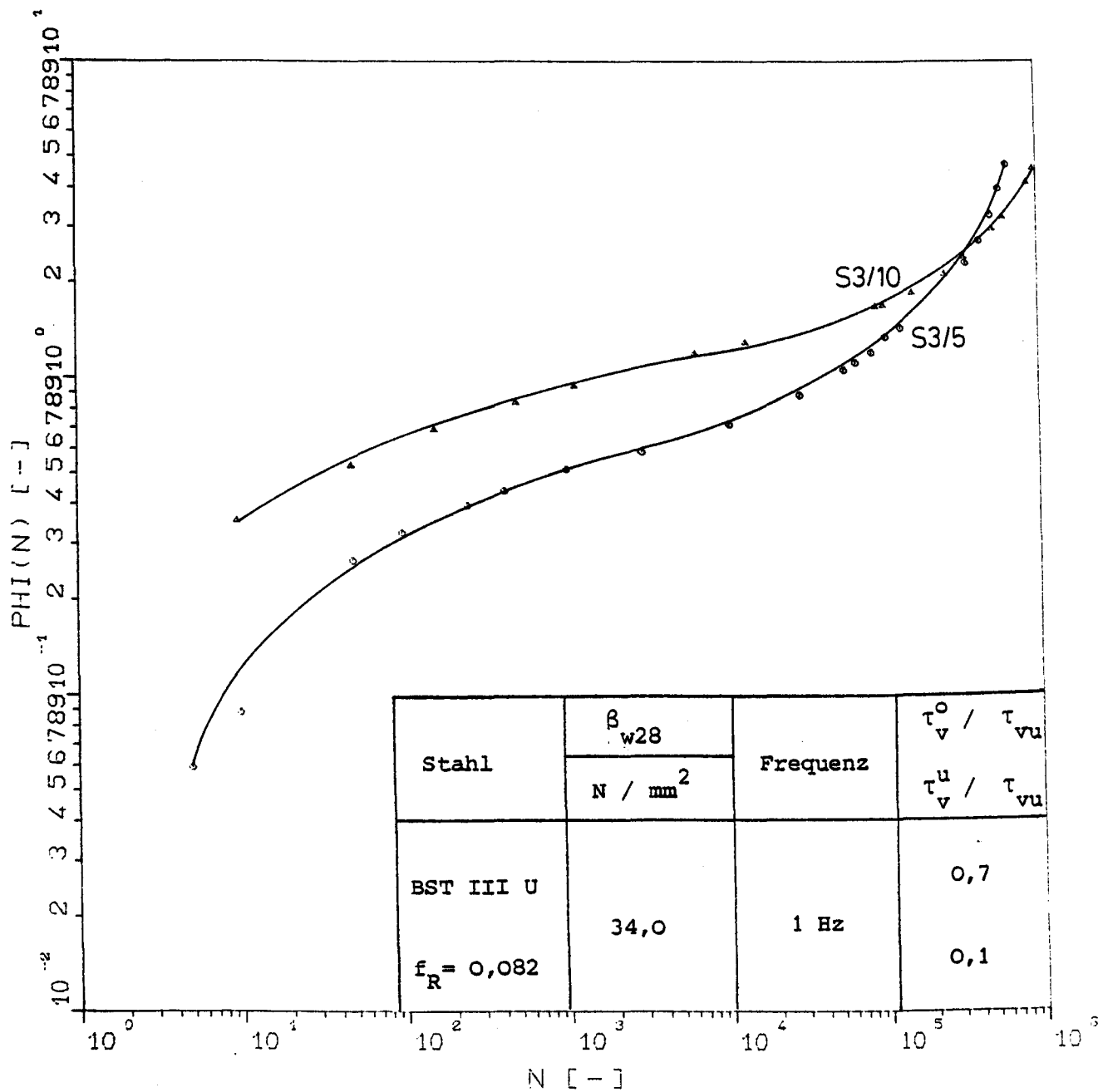
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 3, Körper Nr. 4, 7 und 19)



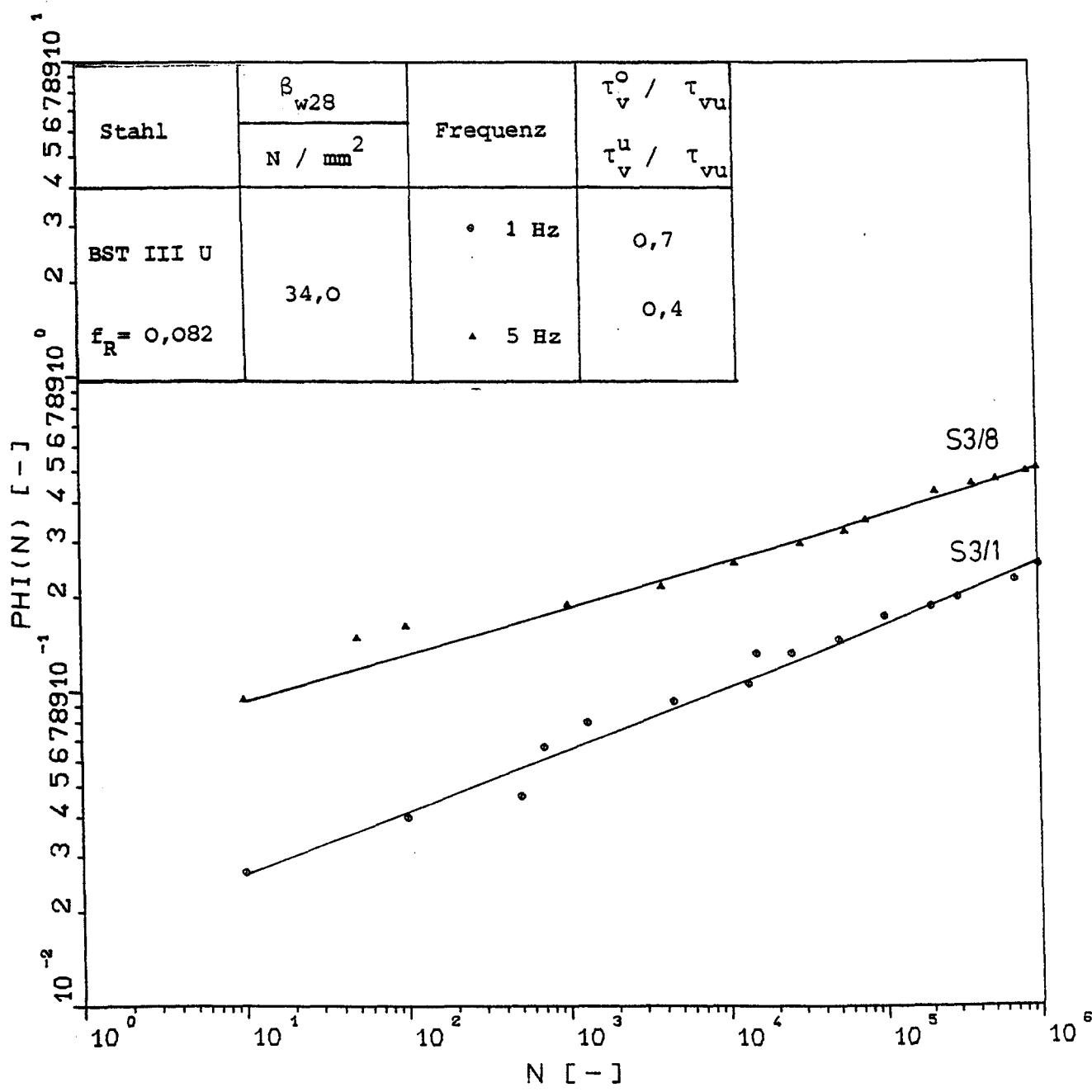
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 3, Körper Nr. 2, 12 und 13)



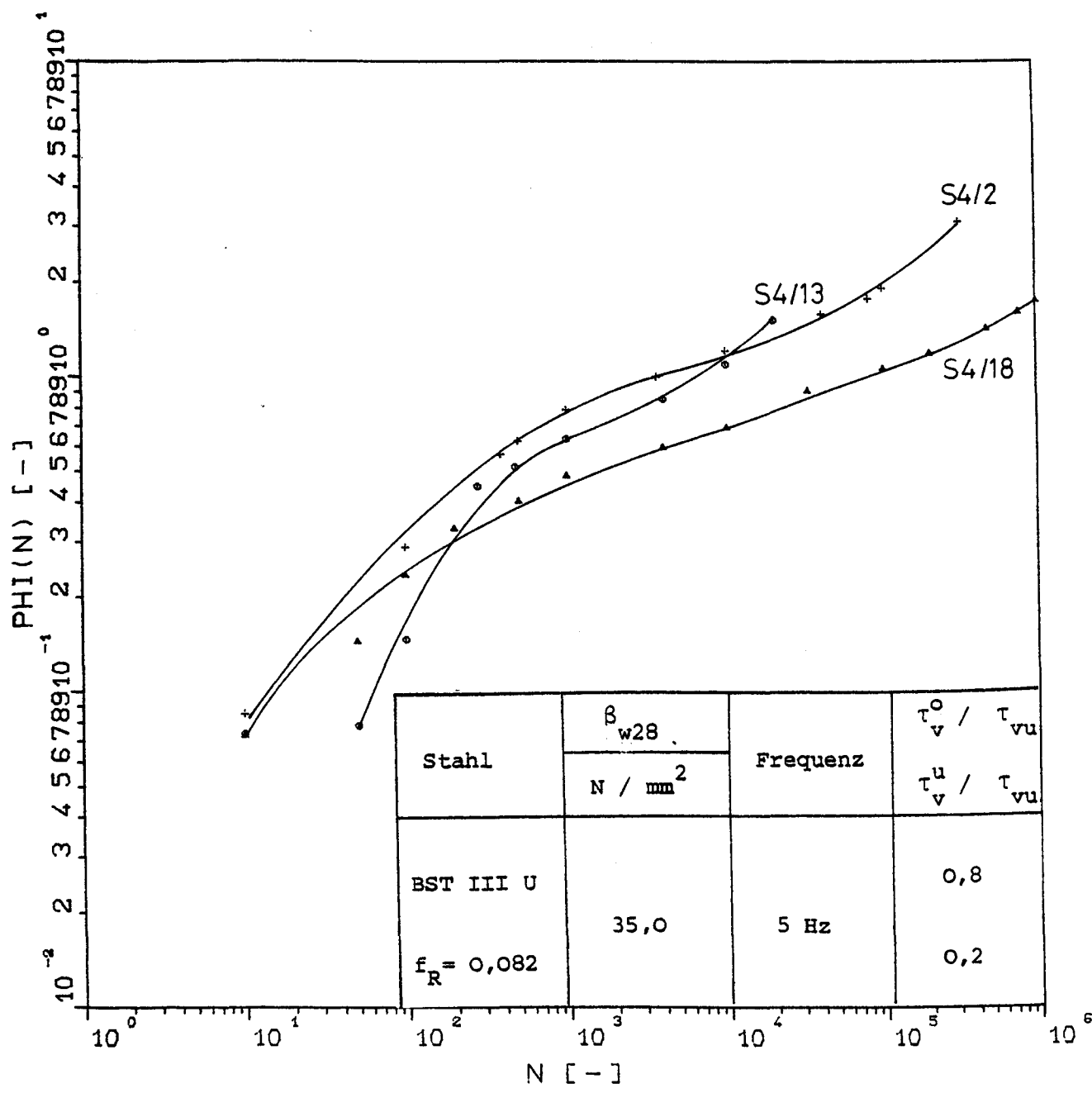
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 3, Körper Nr. 6 und 18)



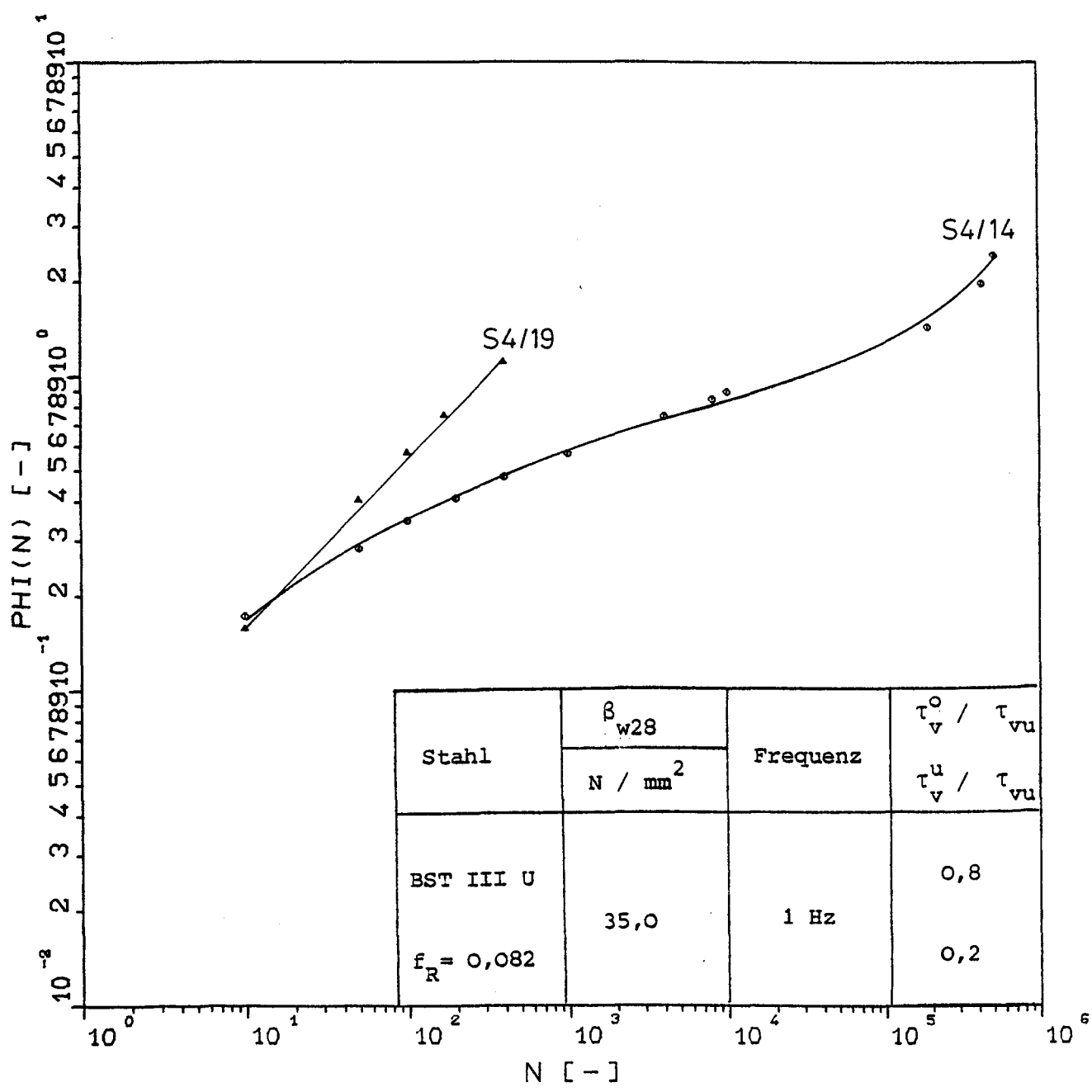
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 3, Körper Nr. 5 und 10)



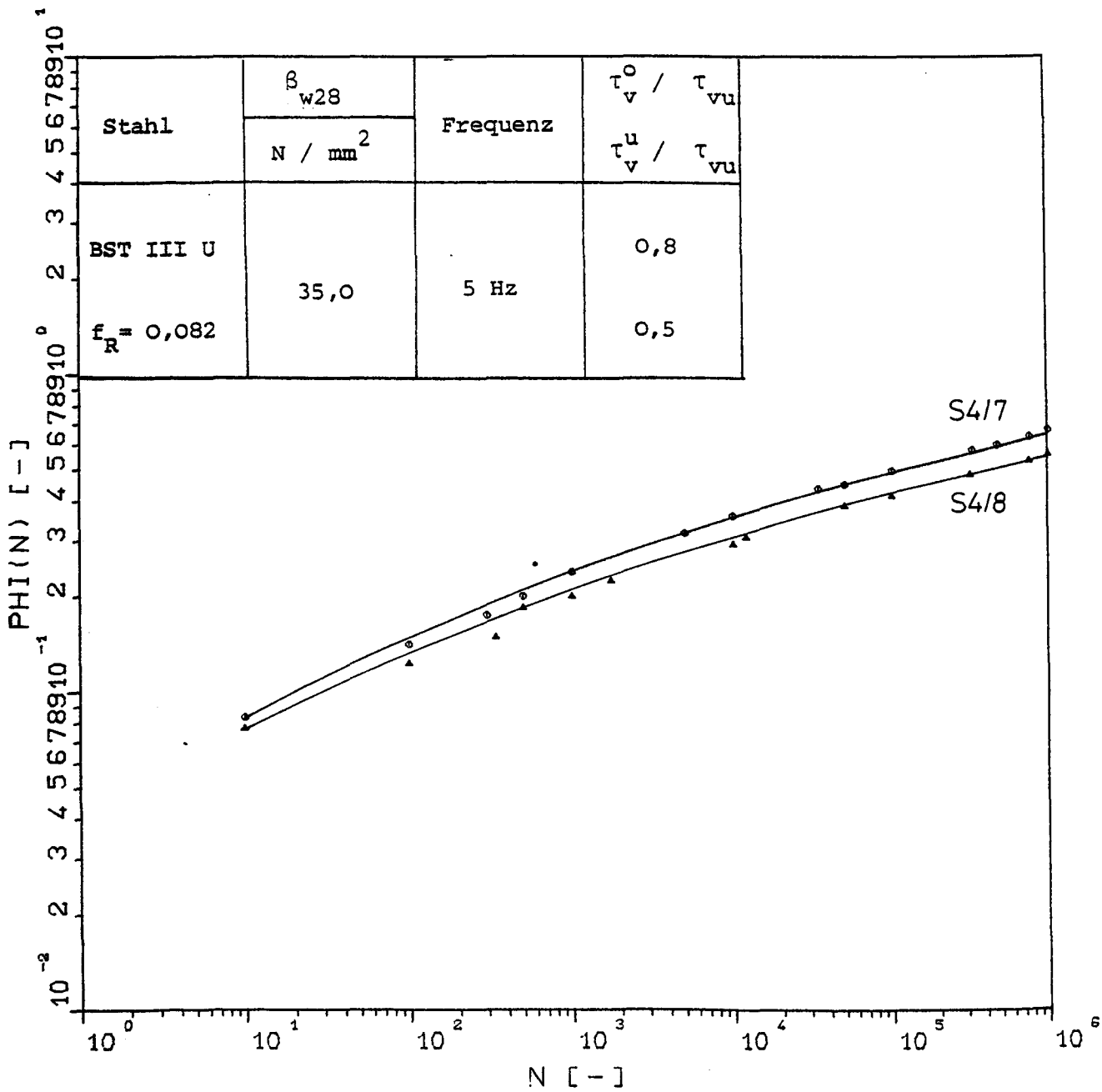
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 3, Körper Nr. 1 und 8)



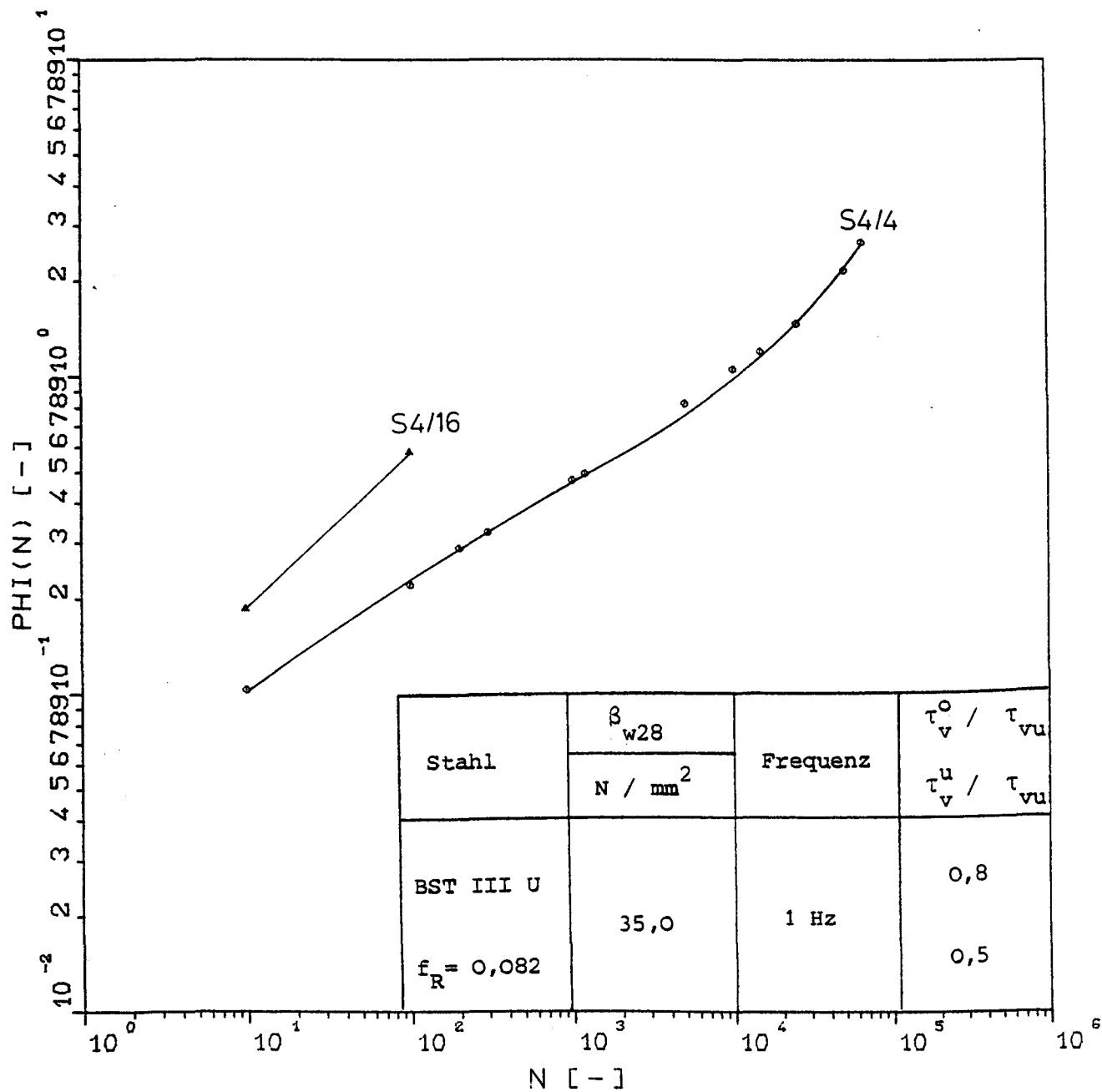
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körper Nr. 2, 13 und 18)



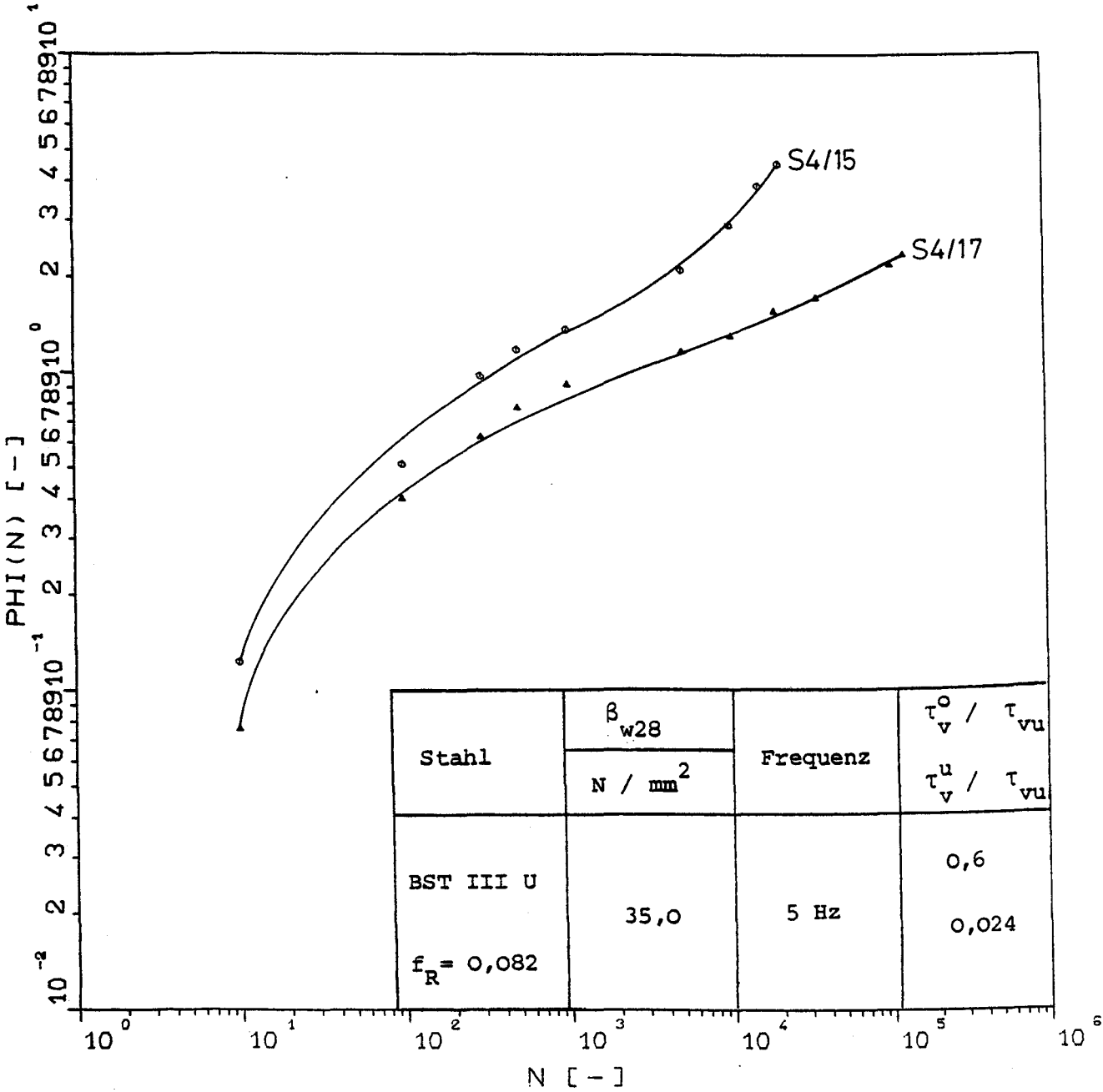
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körper Nr. 14 und 19)



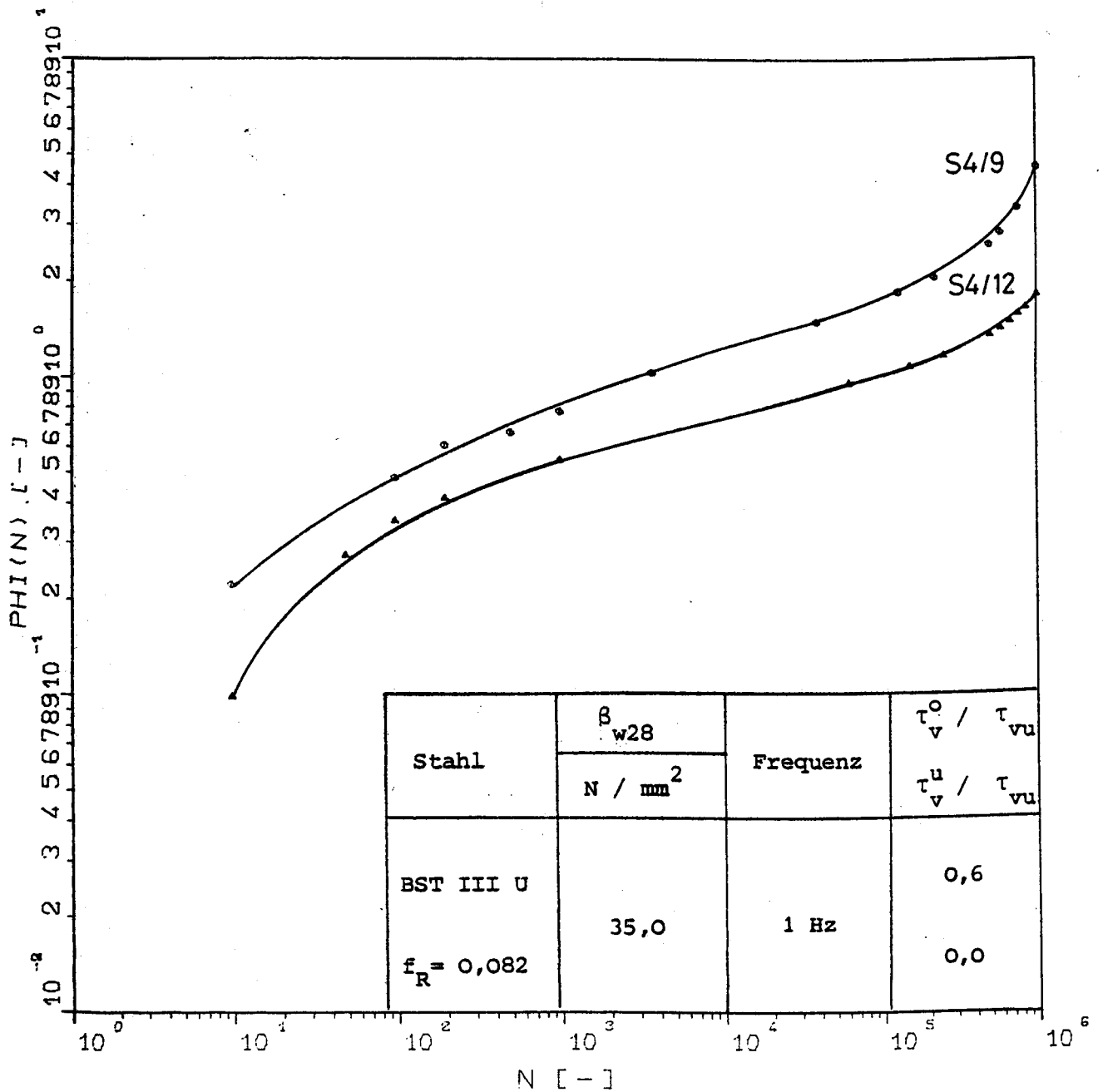
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körper Nr. 7 und 8)



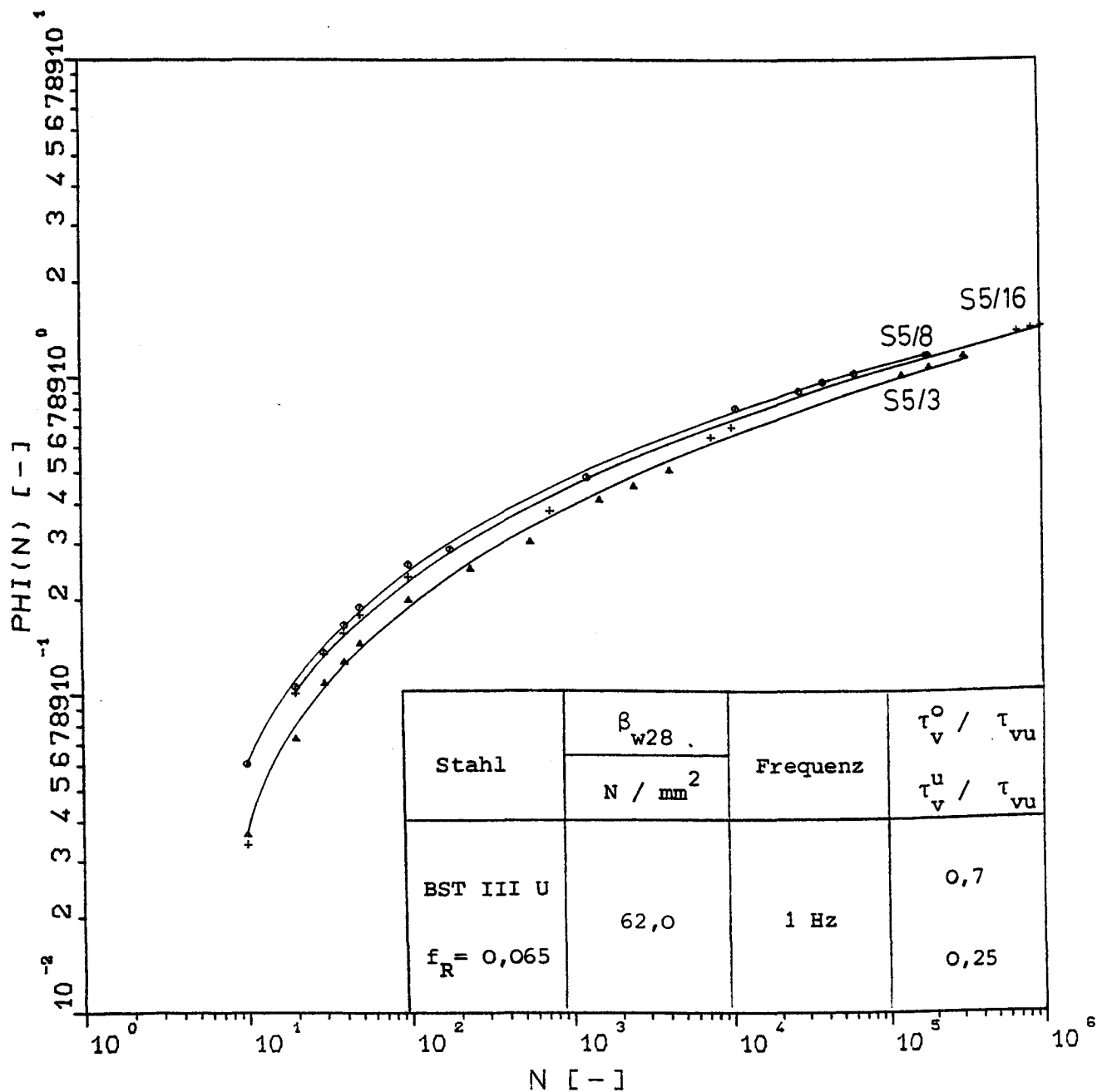
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körper Nr. 4 und 16)



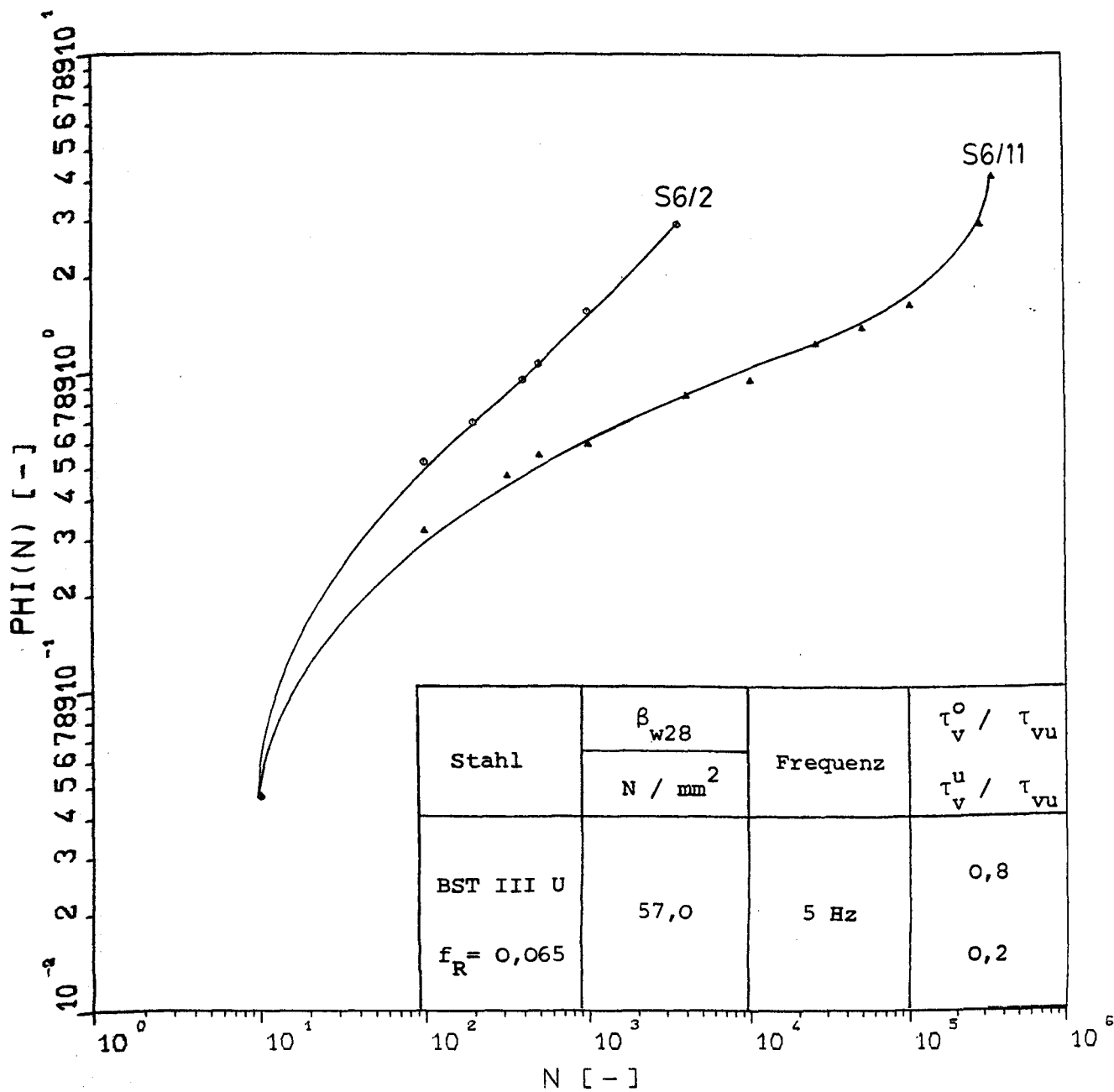
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körepr Nr. 15 und 17)



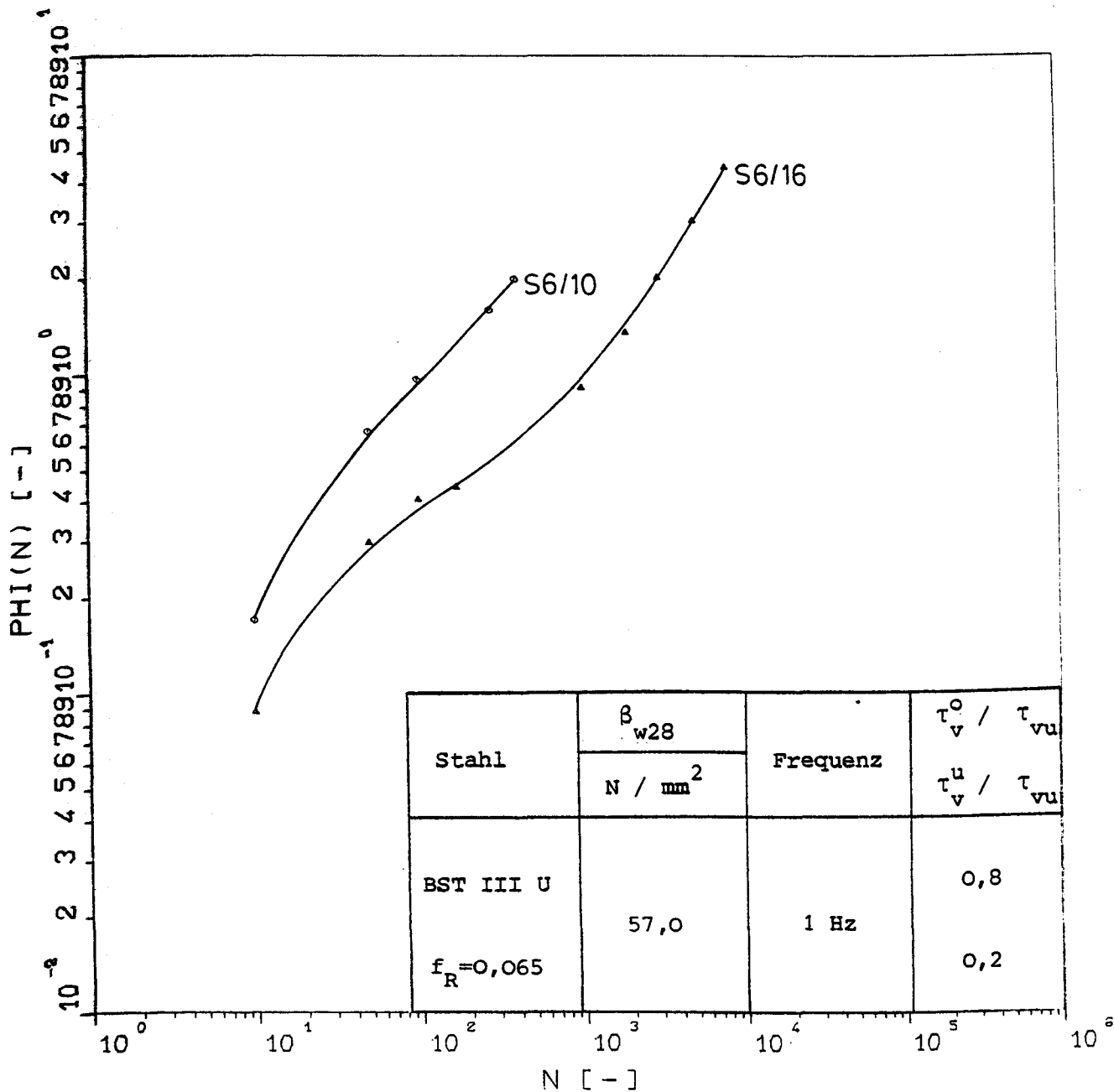
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 4, Körper Nr. 9 und 12)



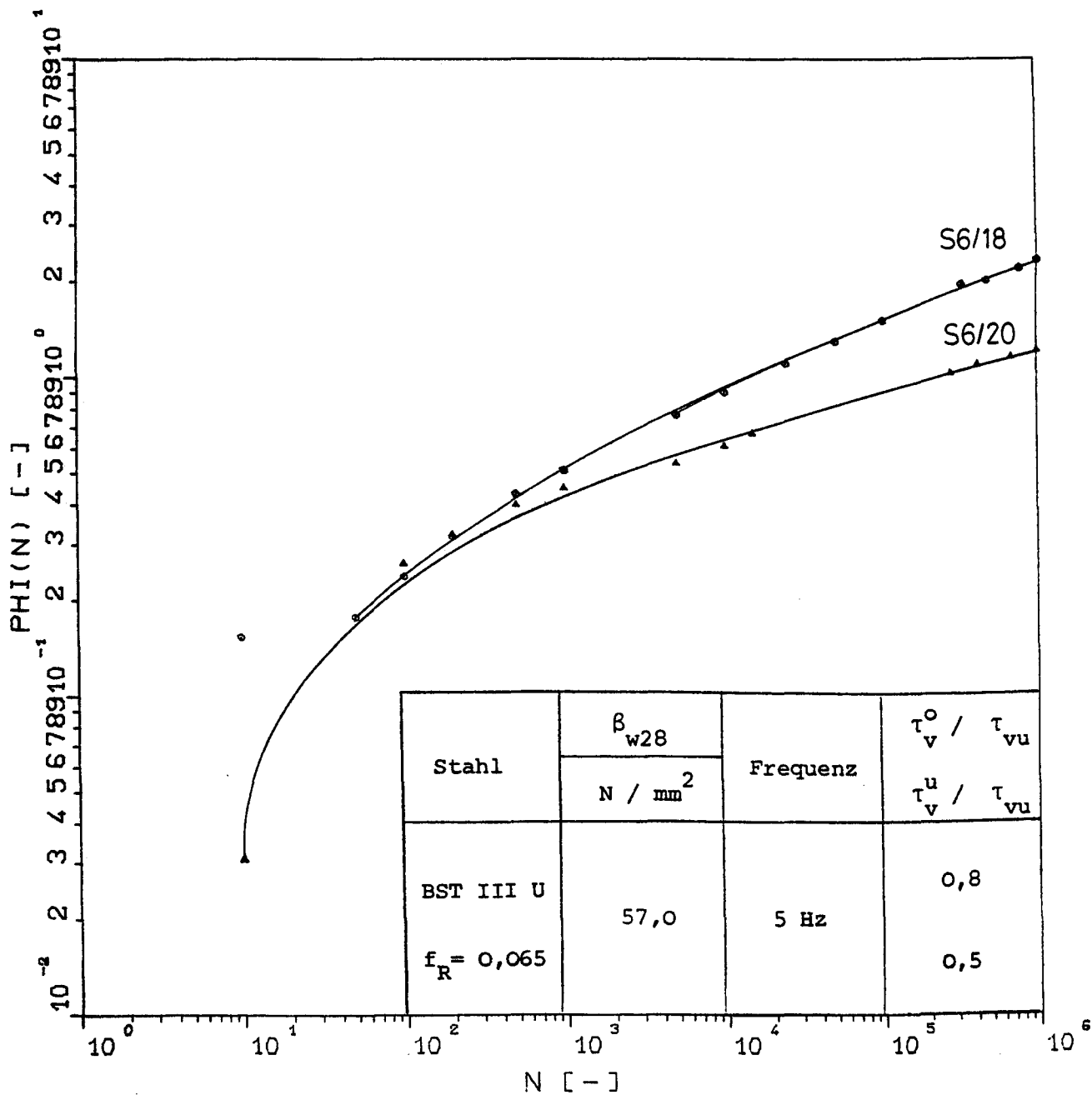
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 5, Körper Nr. 3, 8 und 16)



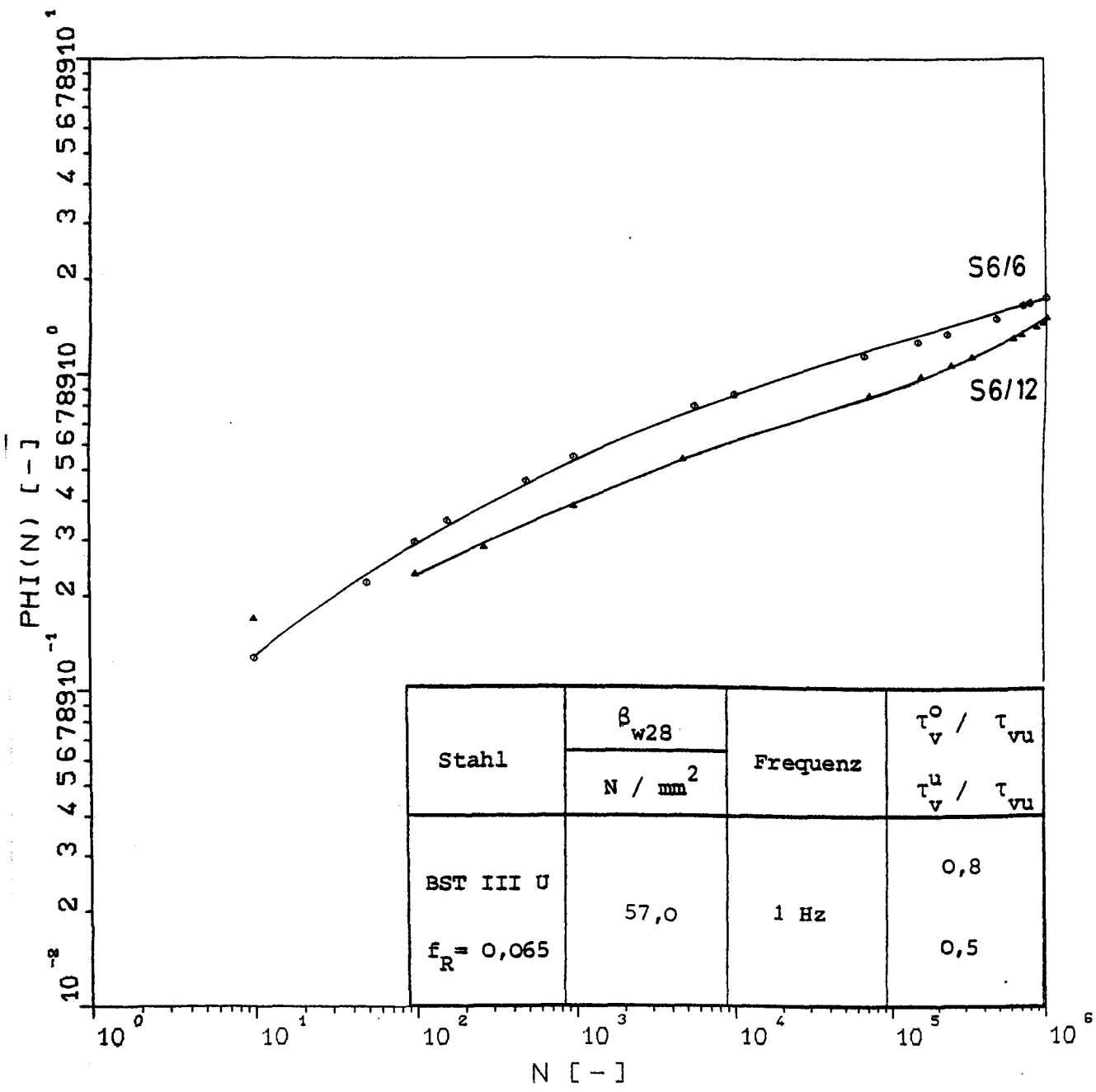
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 6, Körper Nr. 2 und 11)



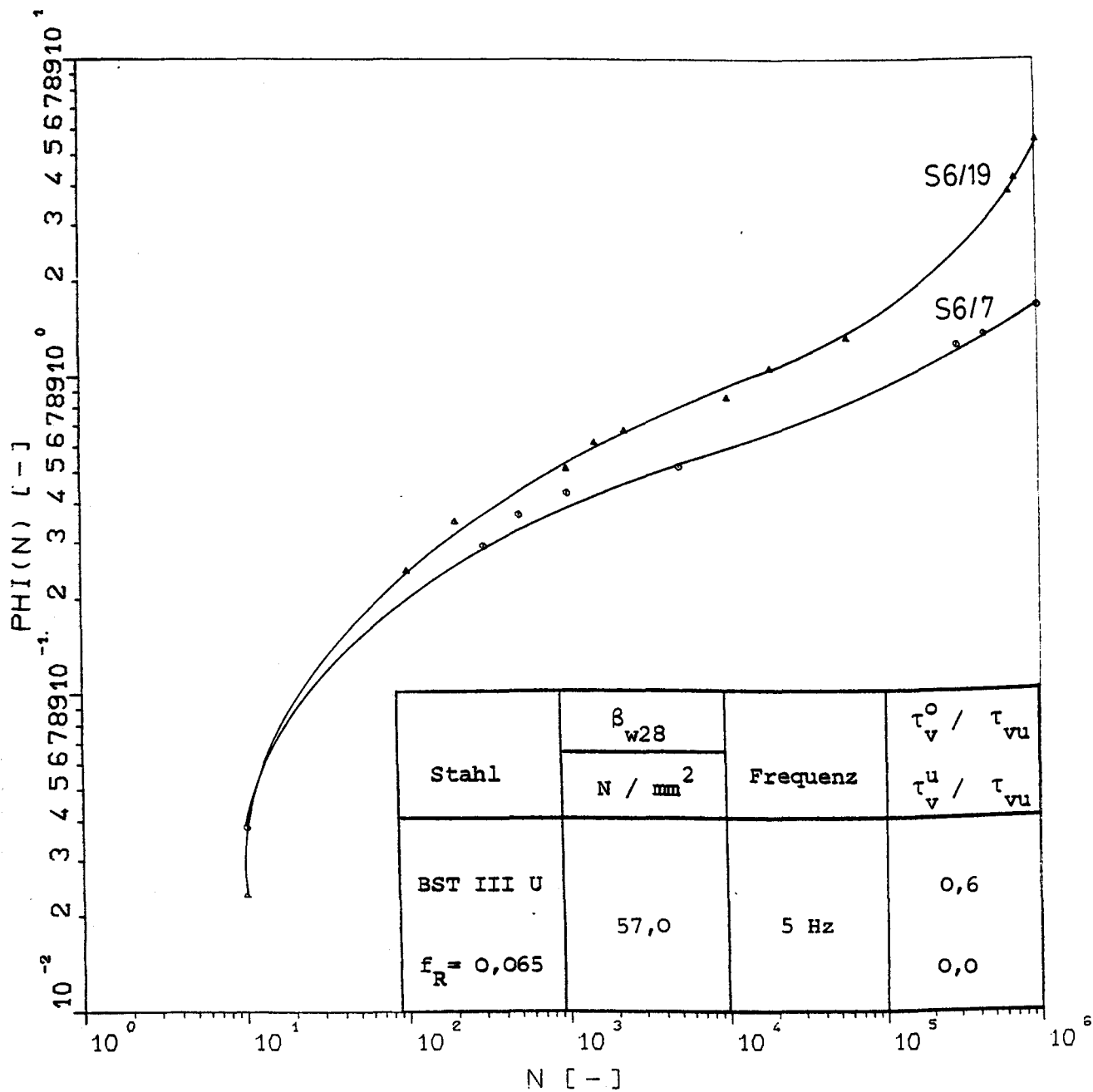
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 6, Körper Nr. 10 und 16)



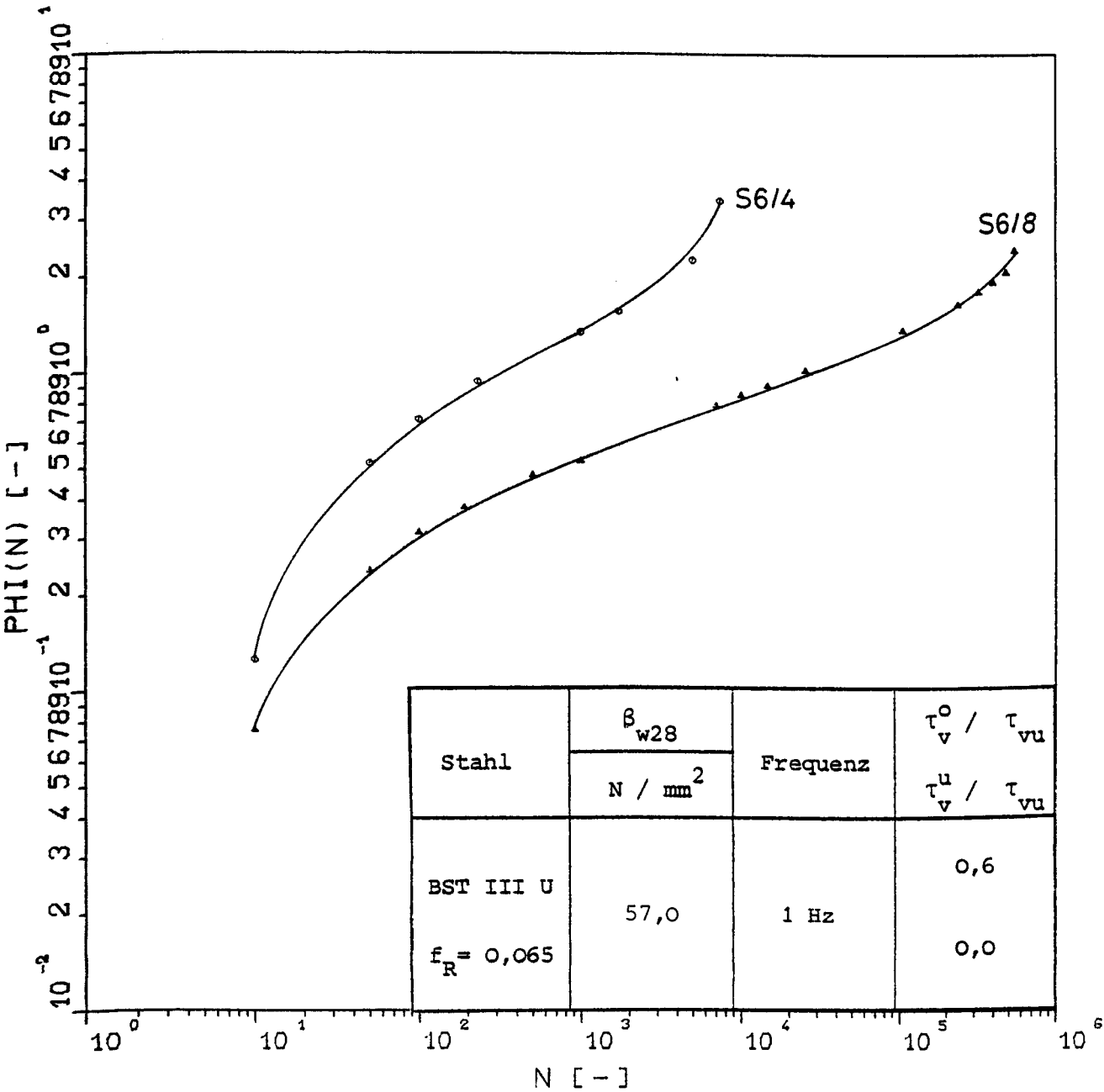
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 6, Körper Nr. 18 und 20)



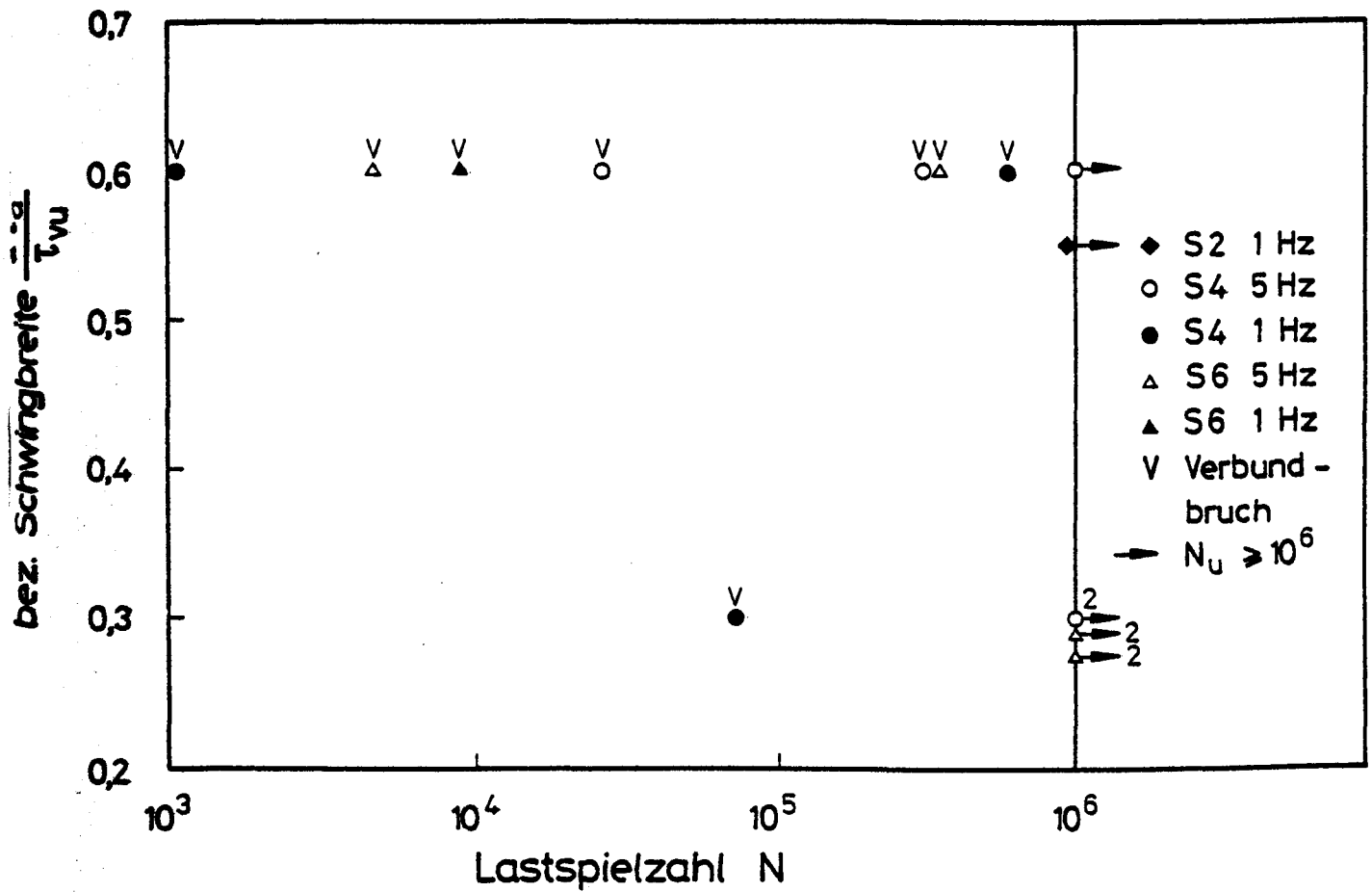
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 6, Körper Nr. 6 und 12)



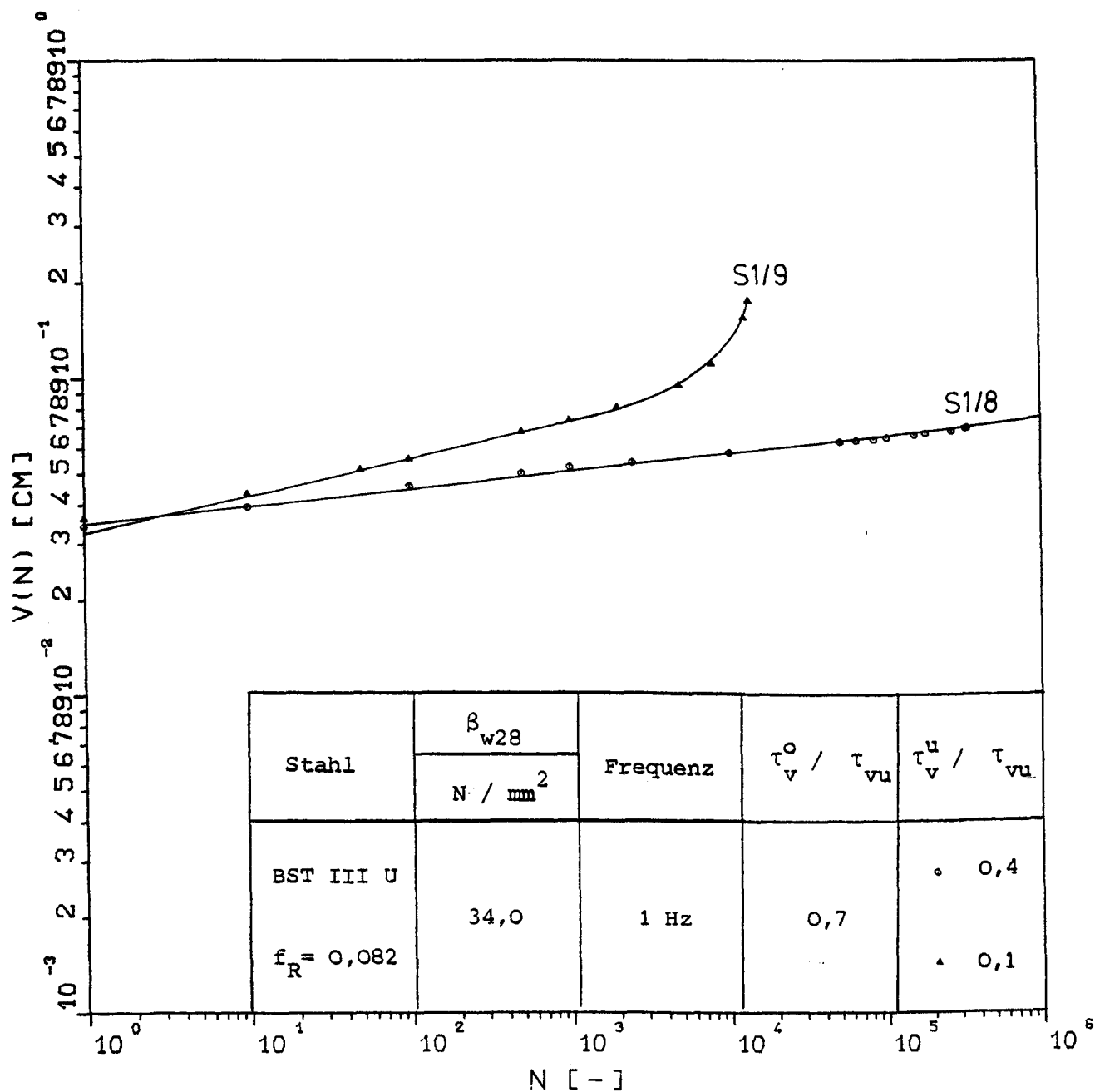
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N Serie 6, Körper Nr. 7 und 19)



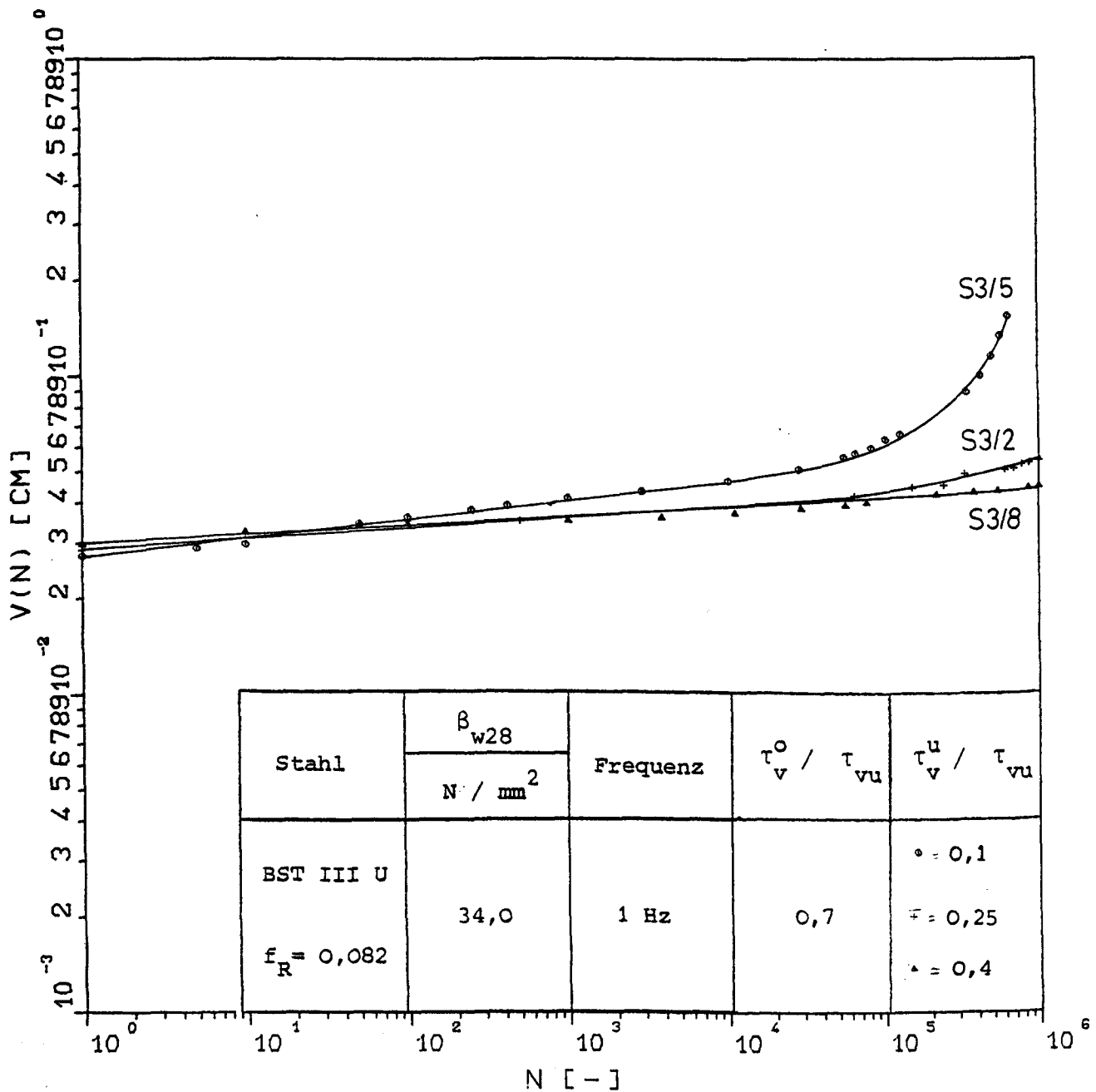
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (Serie 6, Körper Nr. 4 und 8)



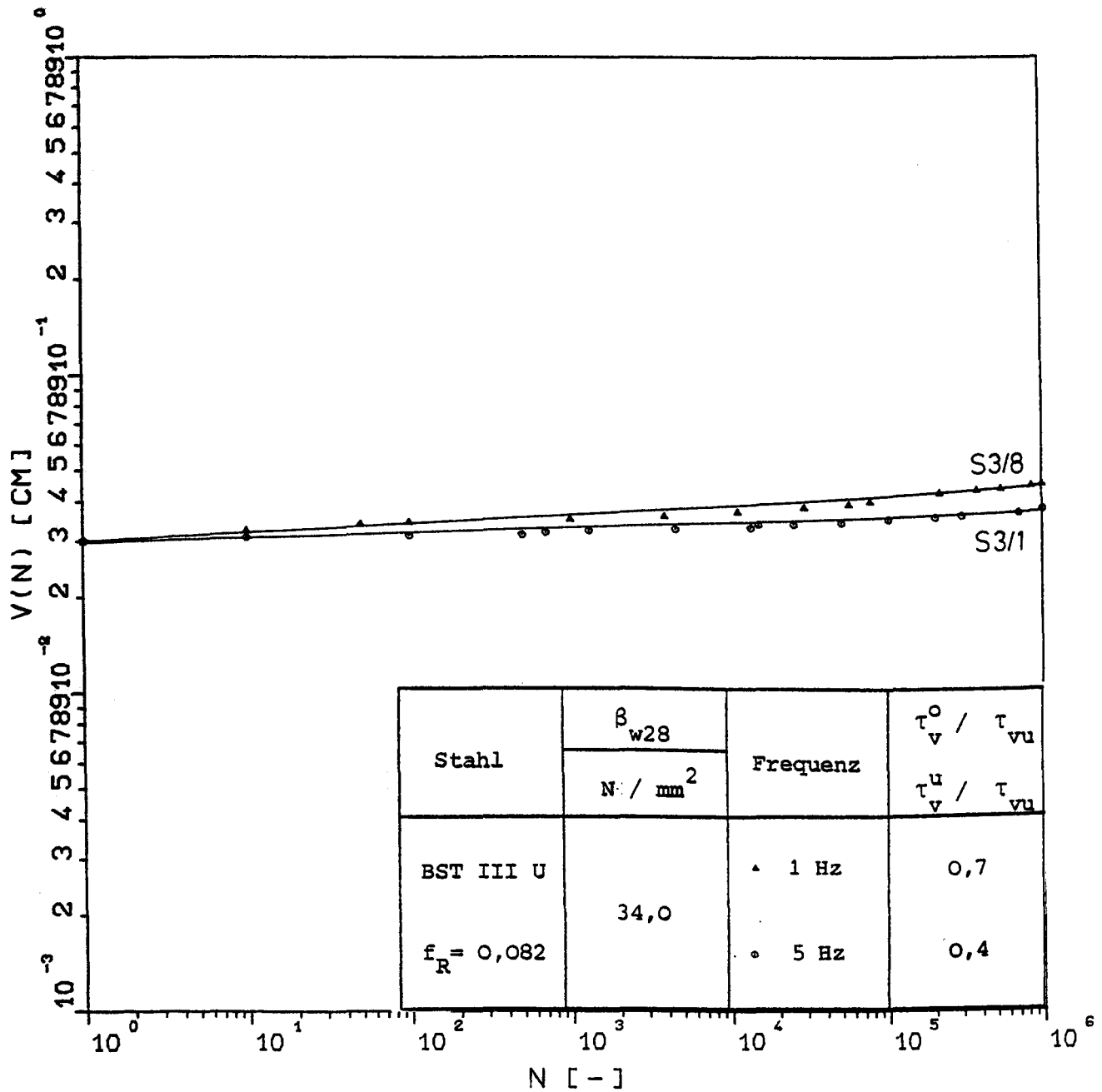
Einfluß der Unterspannung auf die Lebensdauer bei konstanter Ober-
spannung $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$



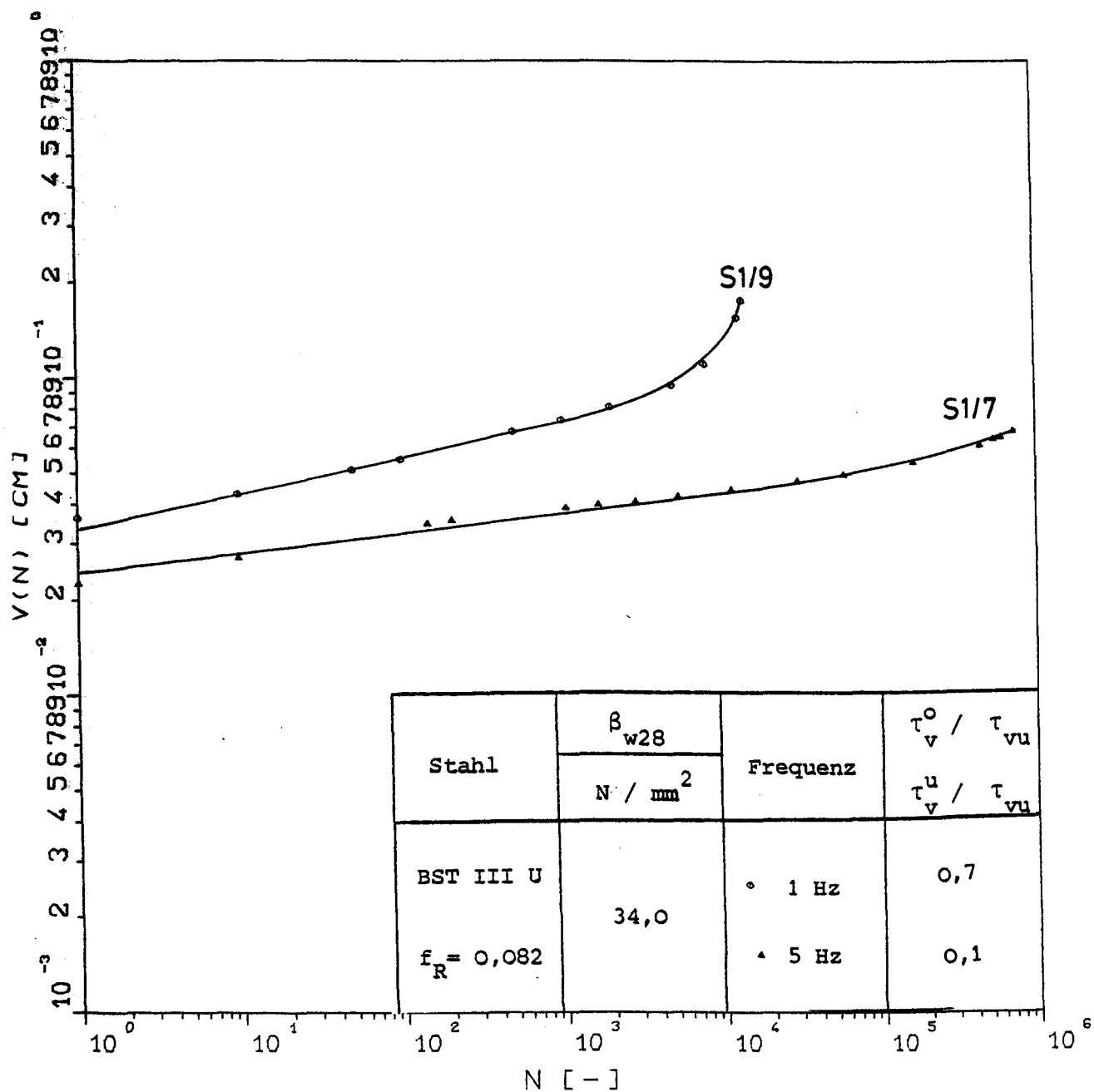
Einfluß der Schwingbreite auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



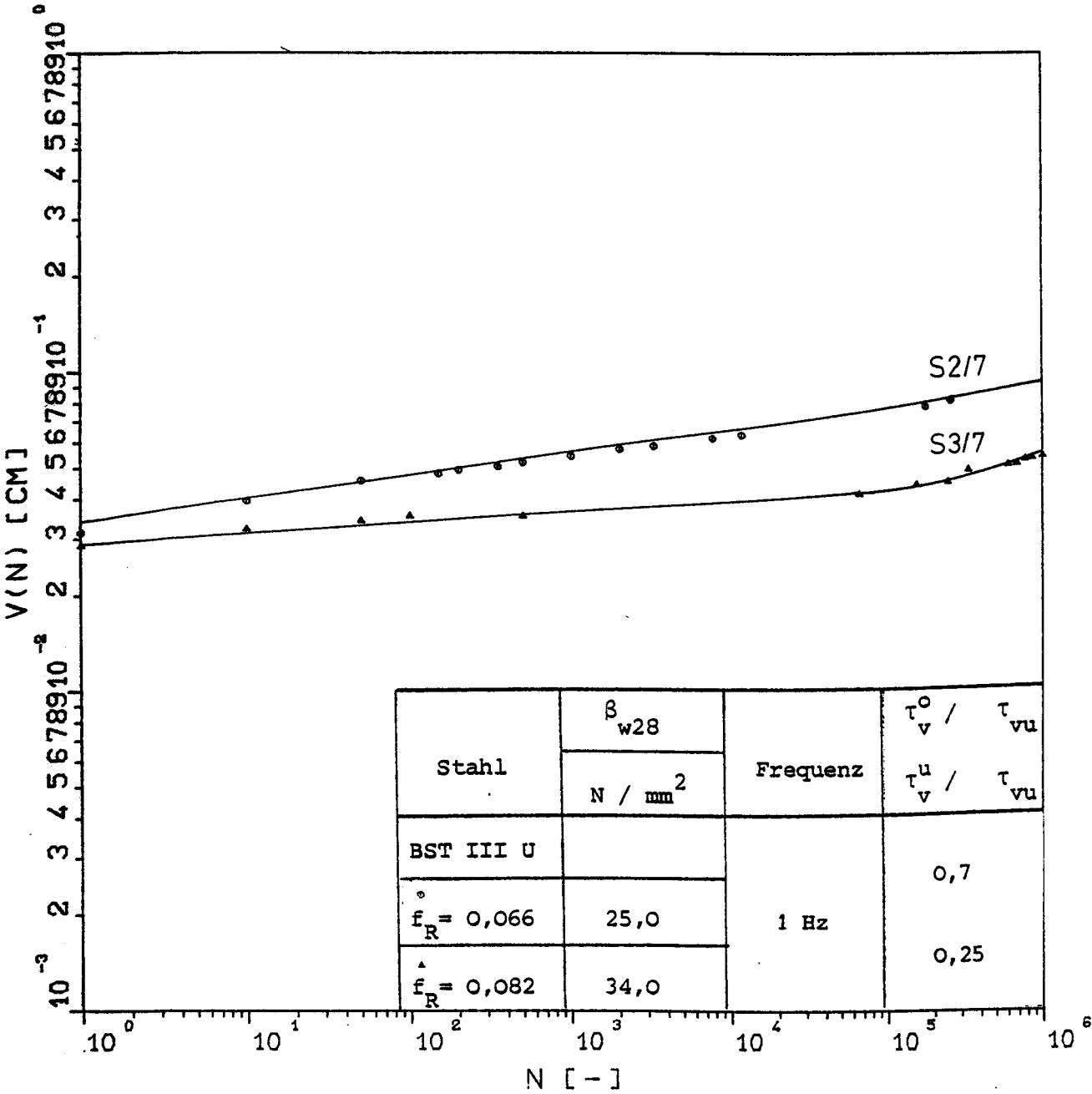
Einfluß der Schwingbreite auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



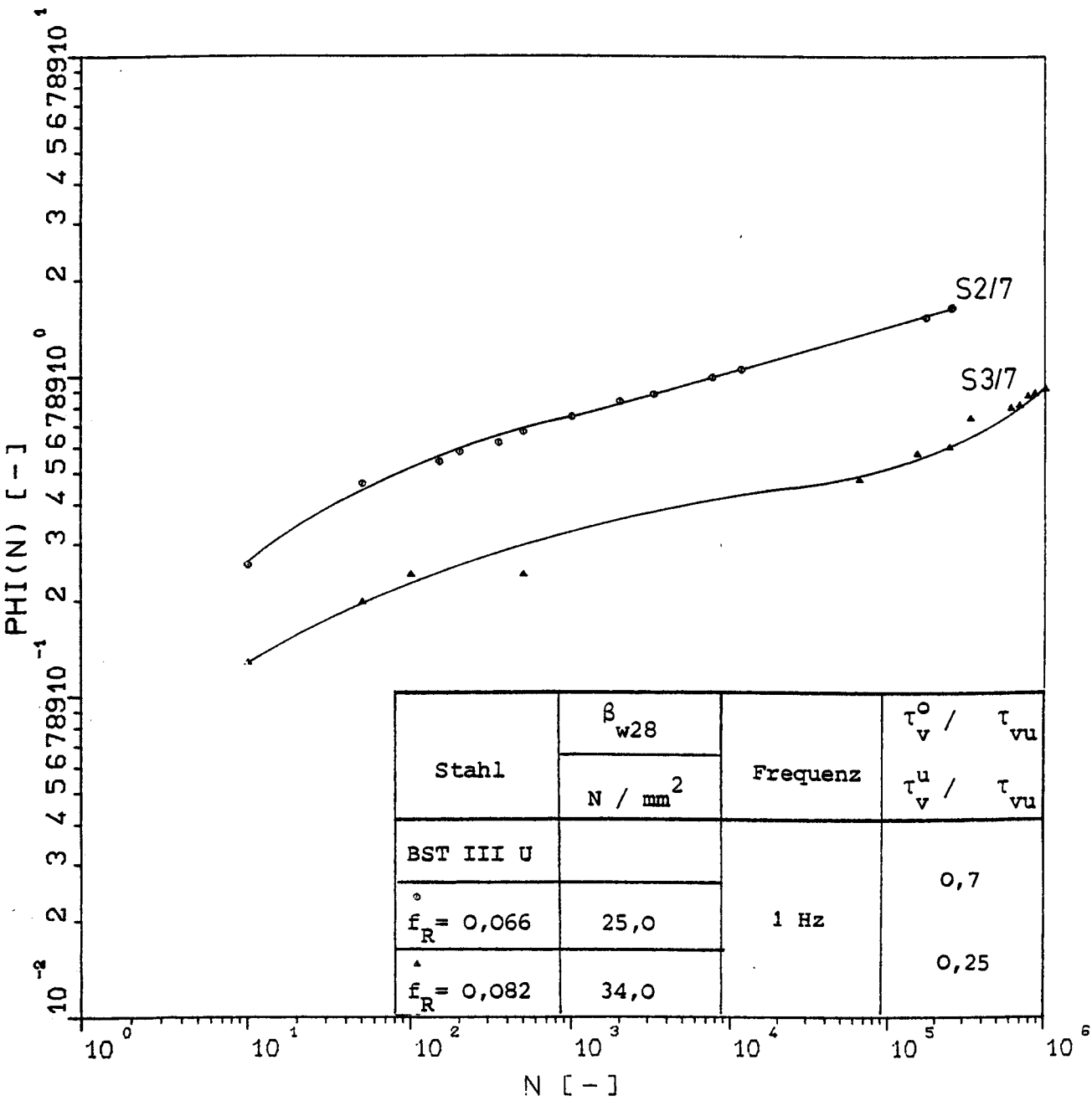
Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



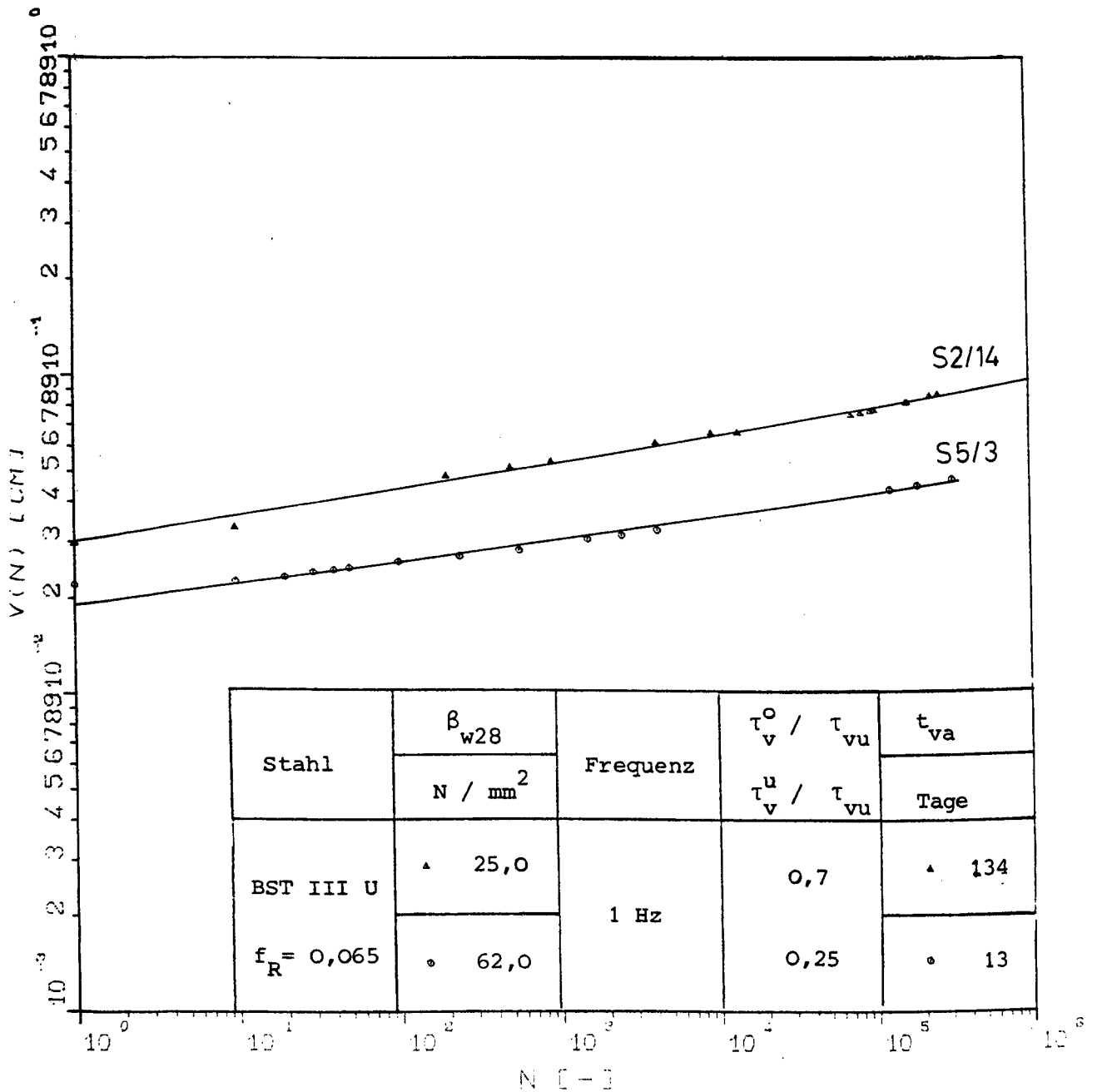
Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



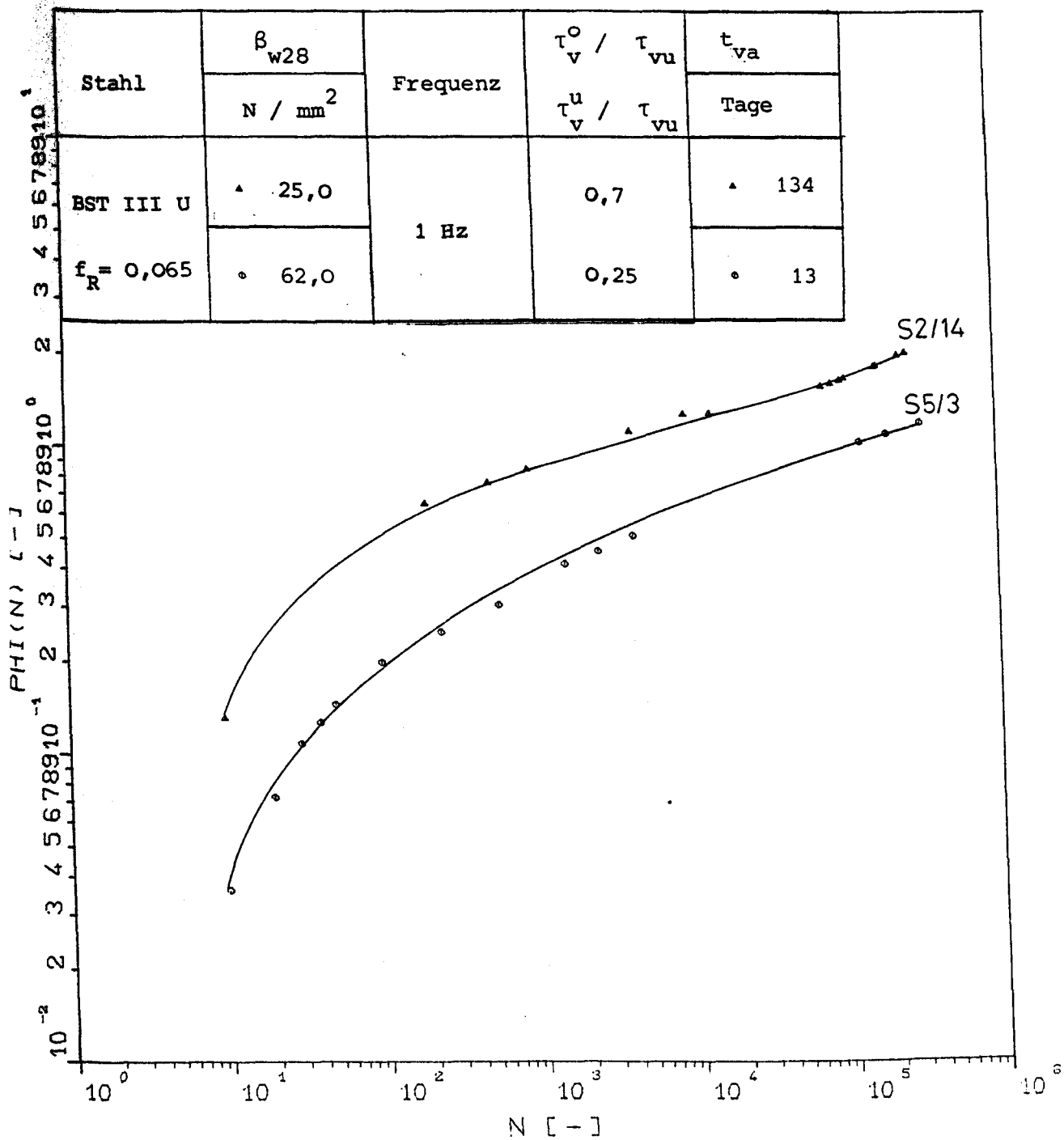
Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



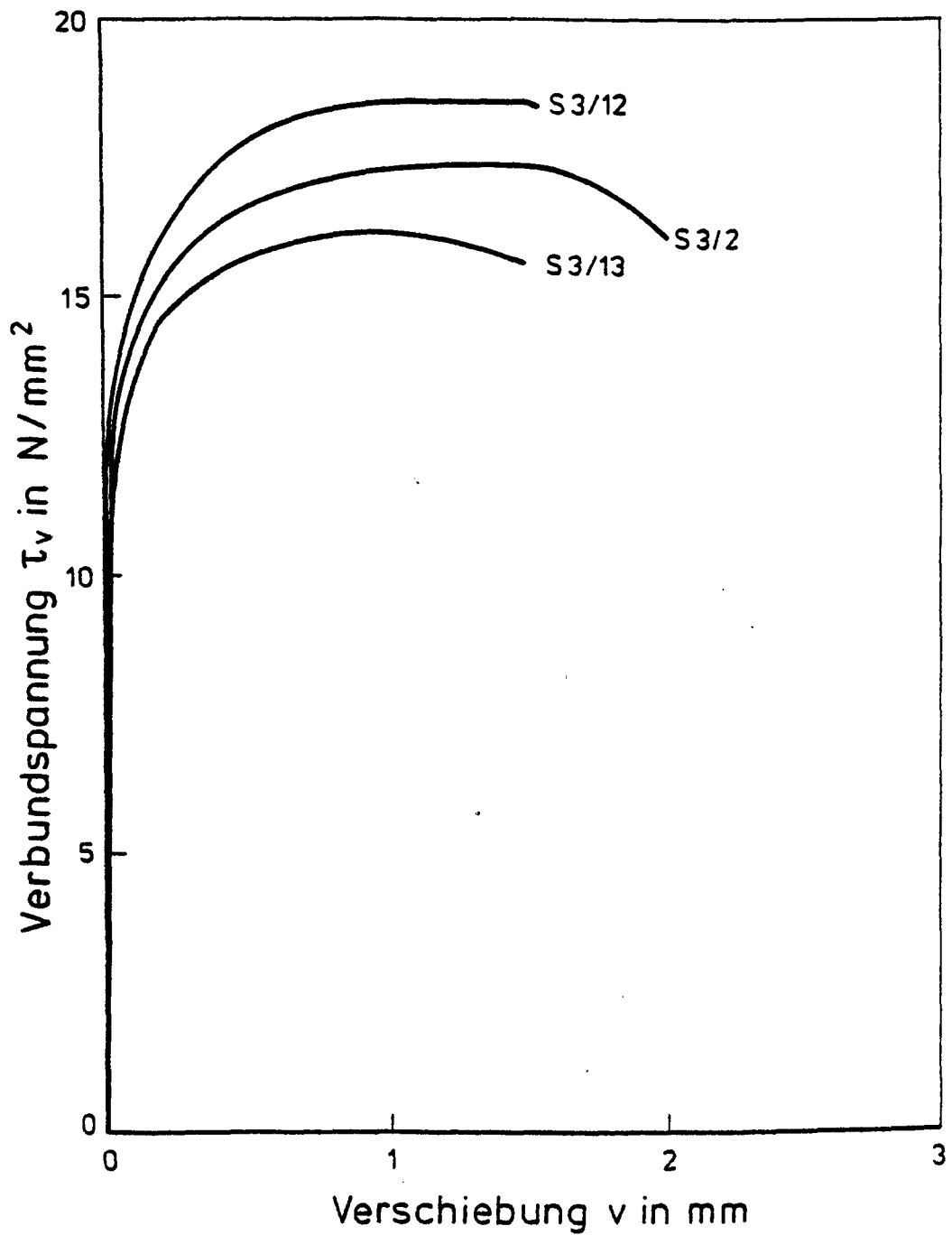
Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



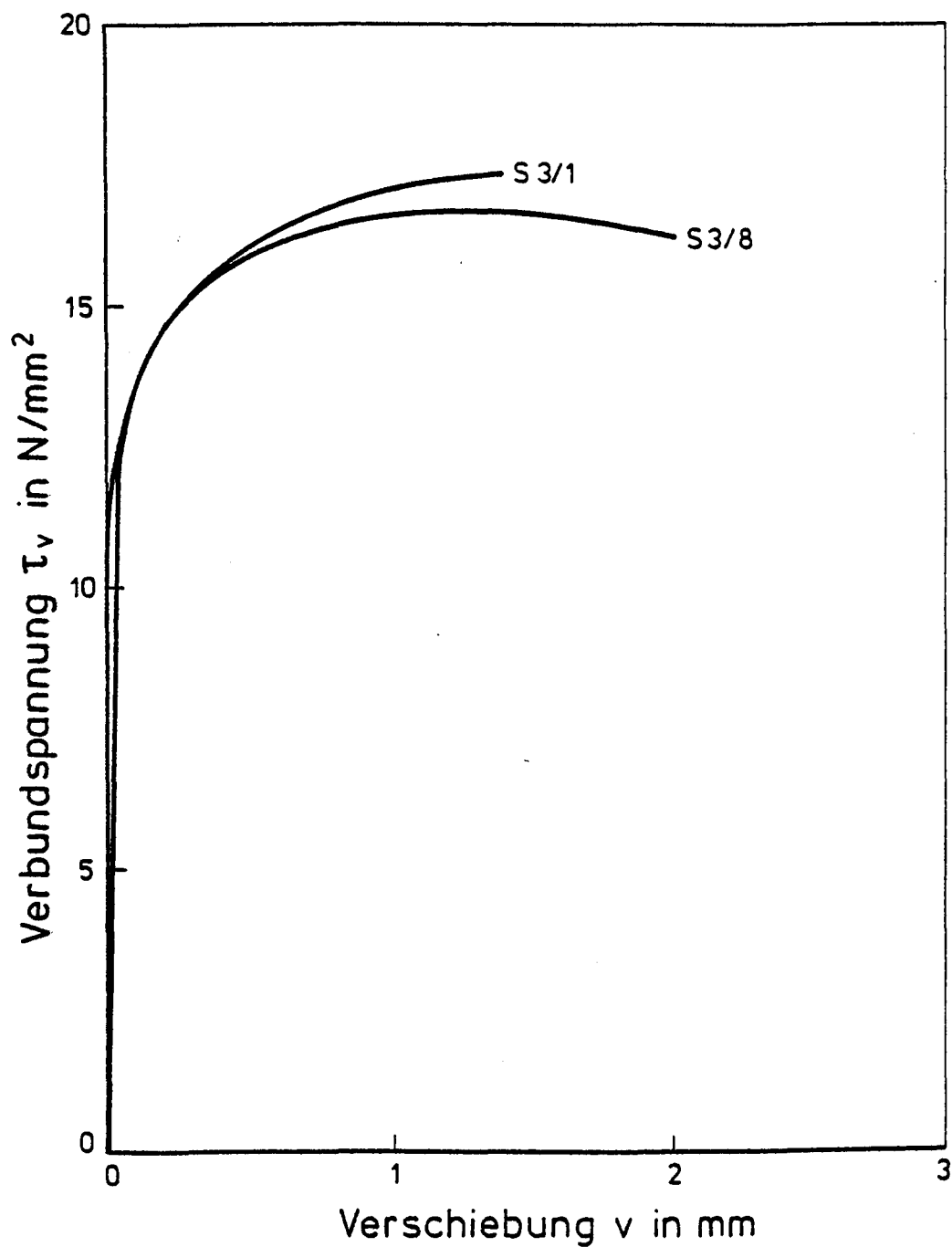
Einfluß des Belastungsalters auf die Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



Einfluß des Belastungsalters auf die Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N



τ_v - v -Beziehung der durch eine Zugschwellbeanspruchung mit $\tau_v^0 / \tau_v^u = 0,7 / 0,25 \tau_{vu}$ vorbelasteten Probekörper der Serie 3



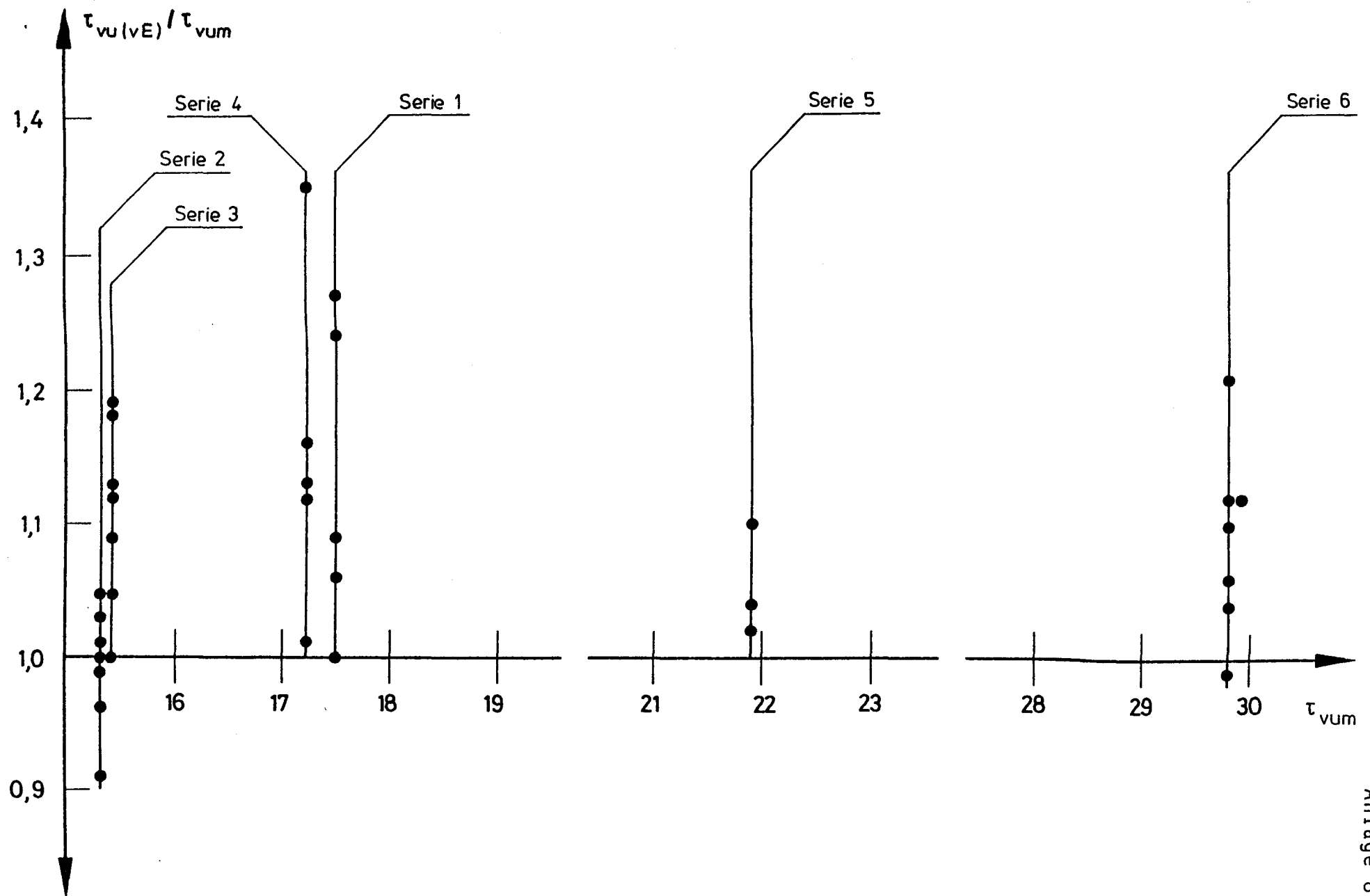
τ_v - v -Beziehung der durch eine Zugschwellbeanspruchung mit $\tau_v^0 / \tau_v^u = 0,7 / 0,4$ τ_{vu} vorbelasteten Probekörper der Serie 3

Mittlerer E-Modul " E_V " der unvorbelasteten Probekörper

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6
E_V (N/mm ³)	55,3	30,2	37,4	38,7	67,4	90,1

Mittlerer E-Modul " E_V " der vorbelasteten Probekörper

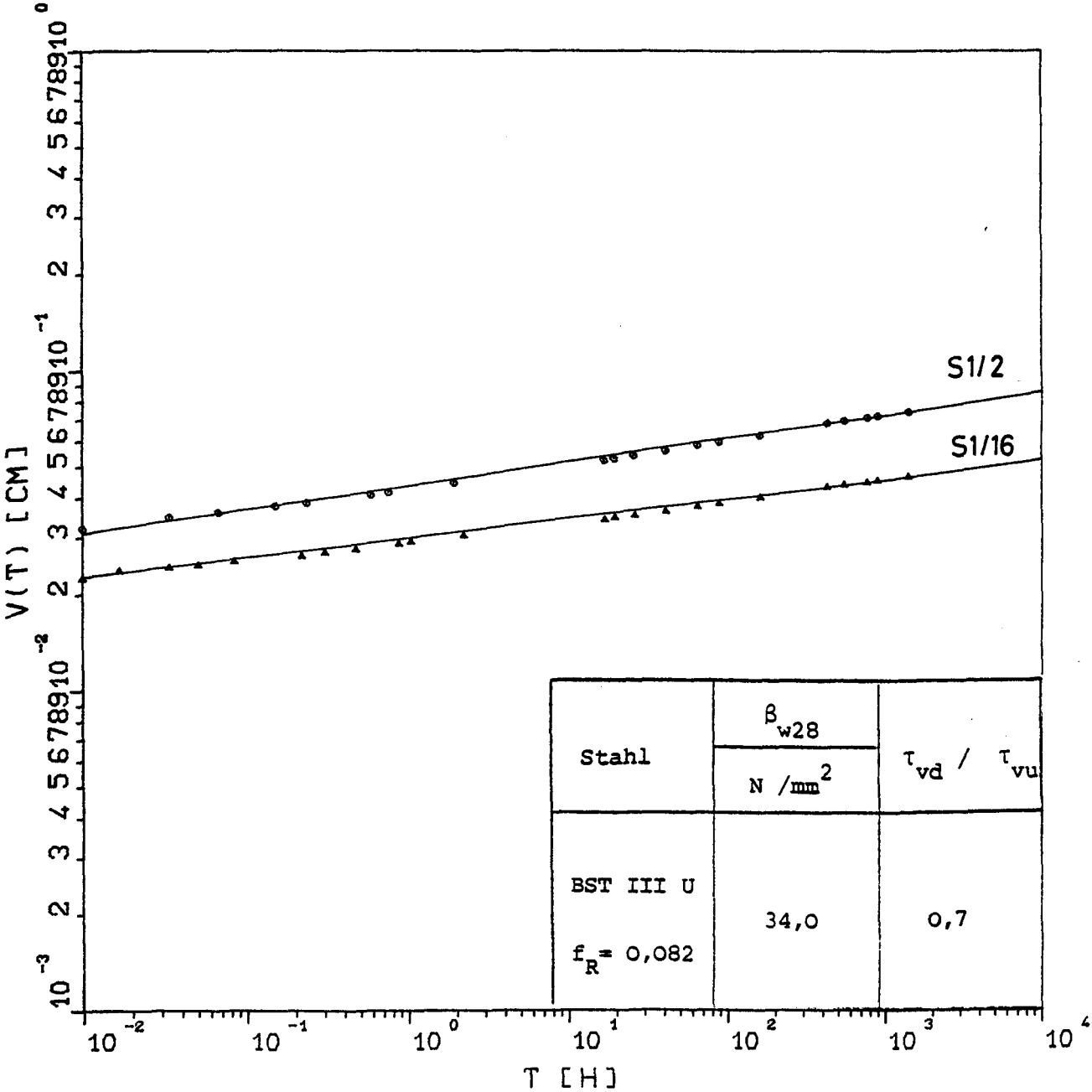
$\tau_V^0 = 0,7 \tau_{vu}$	$\tau_V^u = 0,4 \tau_{vu}$		$\tau_V^u = 0,25 \tau_{vu}$			$\tau_V^u = 0,1 \tau_{vu}$	
	1 Hz	5 Hz	1 Hz	5 Hz	0,2 Hz	1 Hz	5 Hz
E_V (N/mm ³) Serie 1	615,1	596,4	-	497,0	-	-	-
E_V (N/mm ³) Serie 2	-	-	393,5	472,2	462,7	-	-
E_V (N/mm ³) Serie 3	546,7	497,0	362,4	422,5	-	327,0	-
E_V (N/mm ³) Serie 5	-	-	1242,5	-	-	-	-
$\tau_V^0 = 0,8 \tau_{vu}$	$\tau_V^u = 0,5 \tau_{vu}$		$\tau_V^u = 0,2 \tau_{vu}$		$\tau_V^0 = 0,6 \tau_{vu}$	$\tau_V^u = 0$	
	1 Hz	5 Hz	1 Hz	5 Hz		1 Hz	5 Hz
E_V (N/mm ³) Serie 4	-	491,8	-	-		482,5	-
E_V (N/mm ³) Serie 6	925,0	840,2	-	-		515,0	690,3



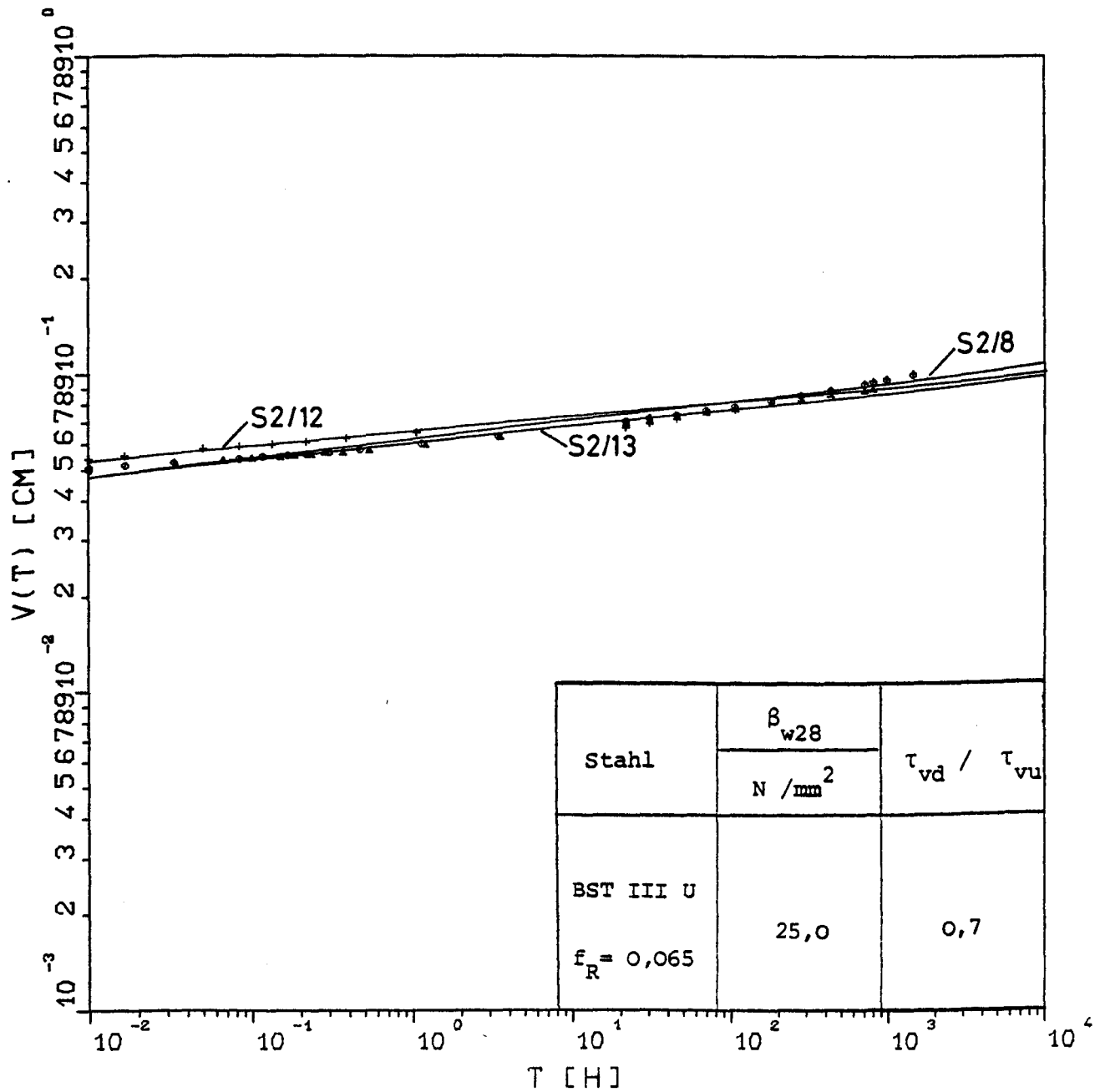
Vergleich der Verbundfestigkeiten unvorbelasteter und durch eine Zugschwellbeanspruchung vorbelasteter Probekörper

Zusammenstellung der Ergebnisse der Dauerstandversuche

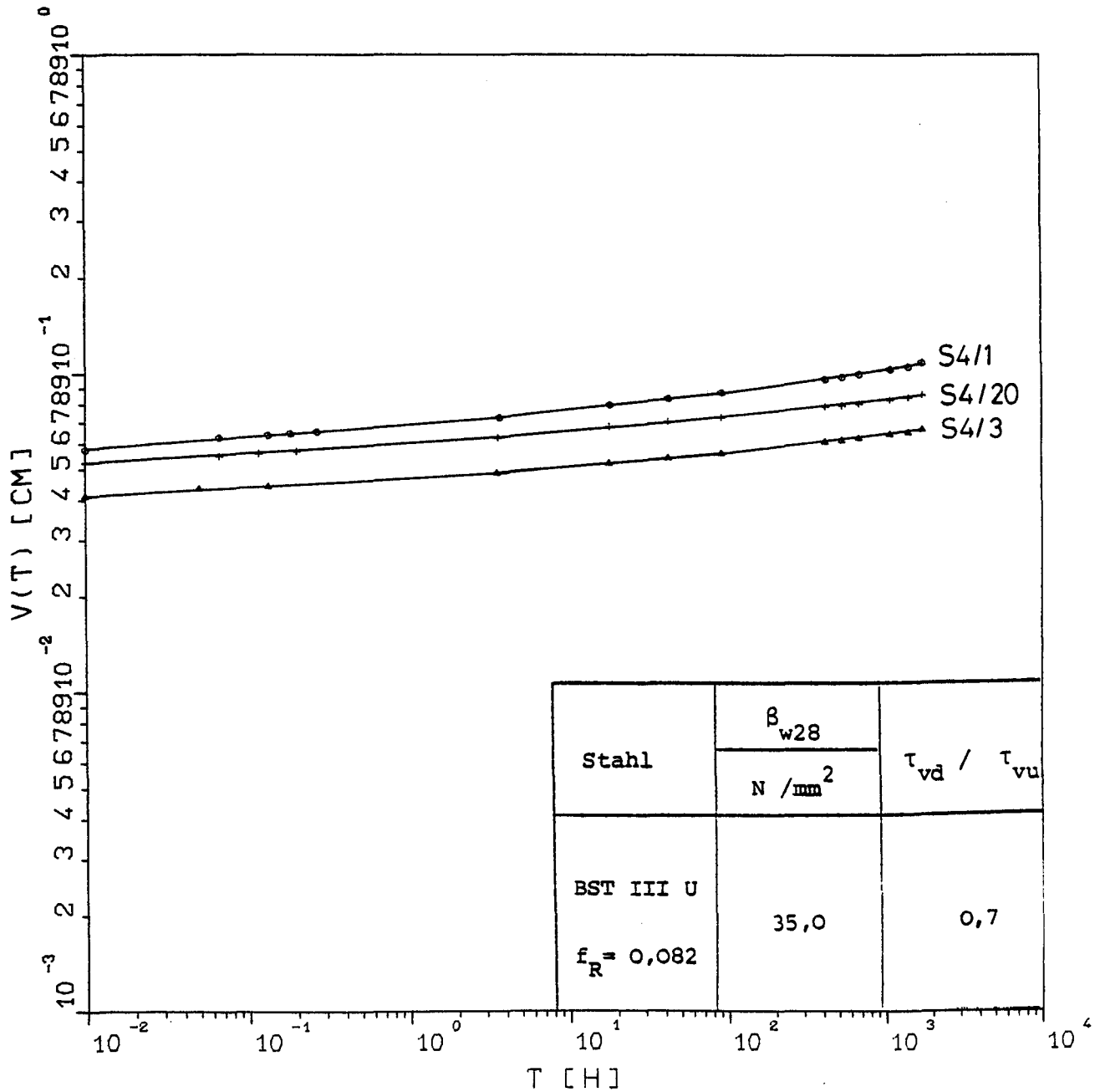
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Serie	Körper Nr.	Dauerlast τ_{vd}/τ_{vu}	v_0 μm	Verschiebung $v \mu m$ unter Dauerlast				$\tau_{vu}(vE)$ N/mm^3	$\tau_{vu}(vE)/$ β_{wvA}	$\tau_{vu}(vE)/$ τ_{vum}
				nach 1 h	10 h	100 h	1000 h			
1	2	0,7	318	457	537	593	724	18,27	0,47	1,04
	16		223	290	347	383	457	18,14	0,47	1,04
2	8	0,7	498	598	-	787	969	14,31	0,45	0,94
	12		513	592	-	773	-	14,71	0,46	0,96
	13		539	649	-	769	978	15,56	0,49	1,02
4	1	0,7	572	-	-	973	1135	14,87	0,40	0,86
	3		410	-	-	560	745	18,22	0,49	1,06
	20		522	-	-	829	933	16,24	0,44	0,94
6	9	0,7	252	-	-	473	601	30,44	0,50	1,02
	13		249	-	-	491	657	28,29	0,46	0,95
	14		231	-	-	483	614	28,16	0,46	0,94



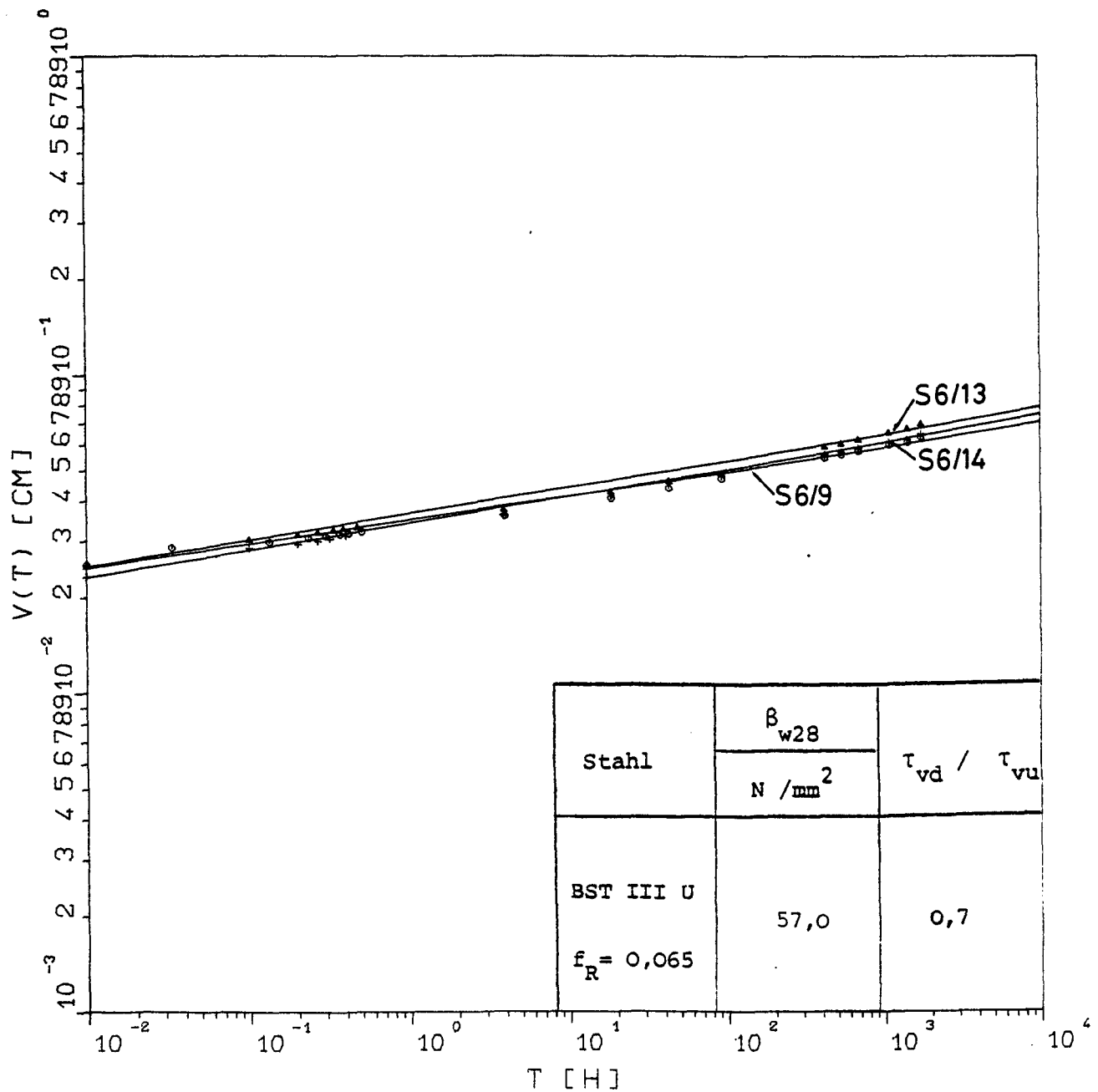
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T
(Serie 1, Körper Nr. 2 und 16)



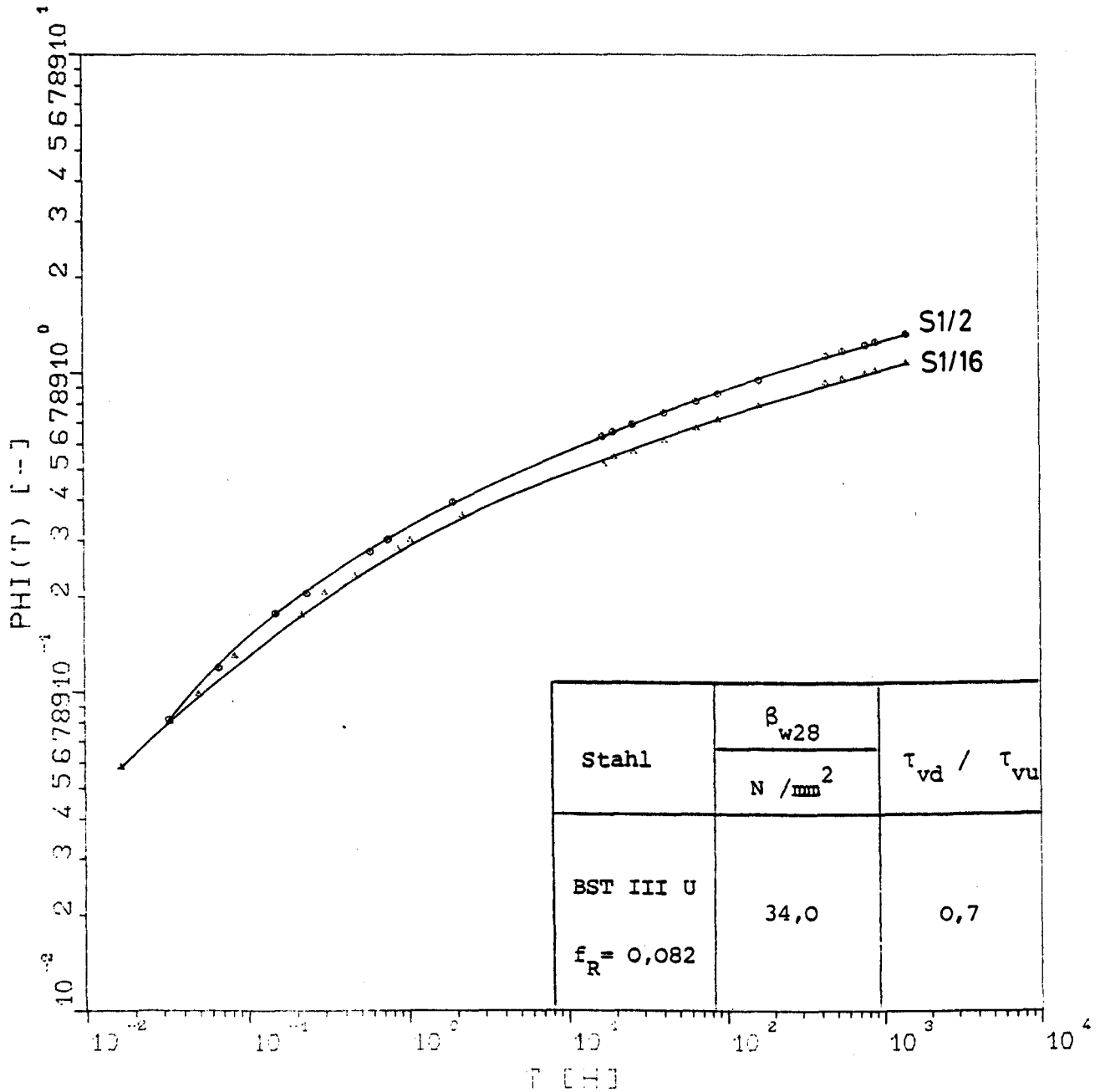
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T
(Serie 2, Körper Nr. 8, 12 und 13)



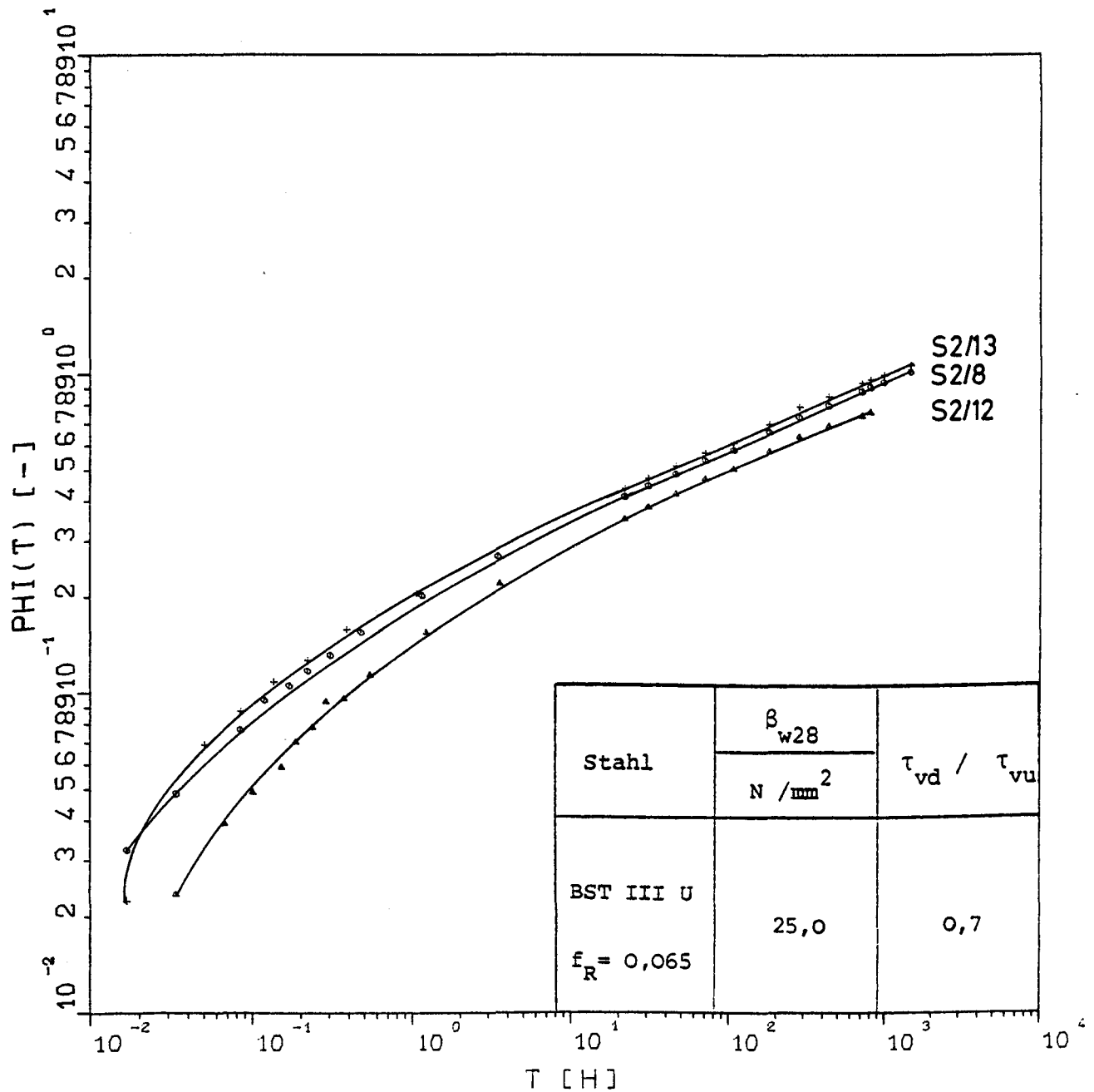
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T
(Serie 4, Körper Nr. 1, 3 und 20)



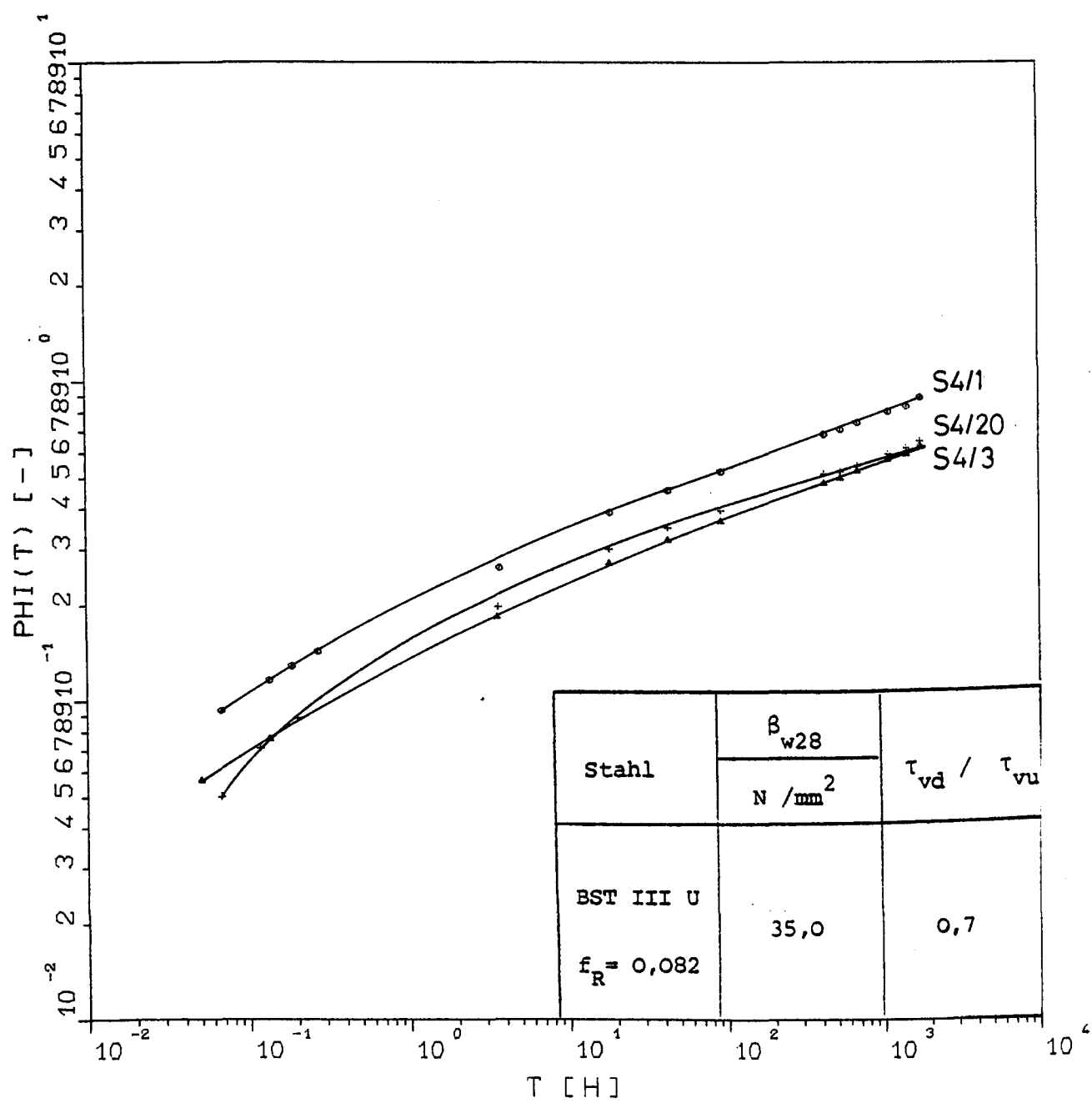
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T
(Serie 6, Körper Nr. 9, 13 und 14)



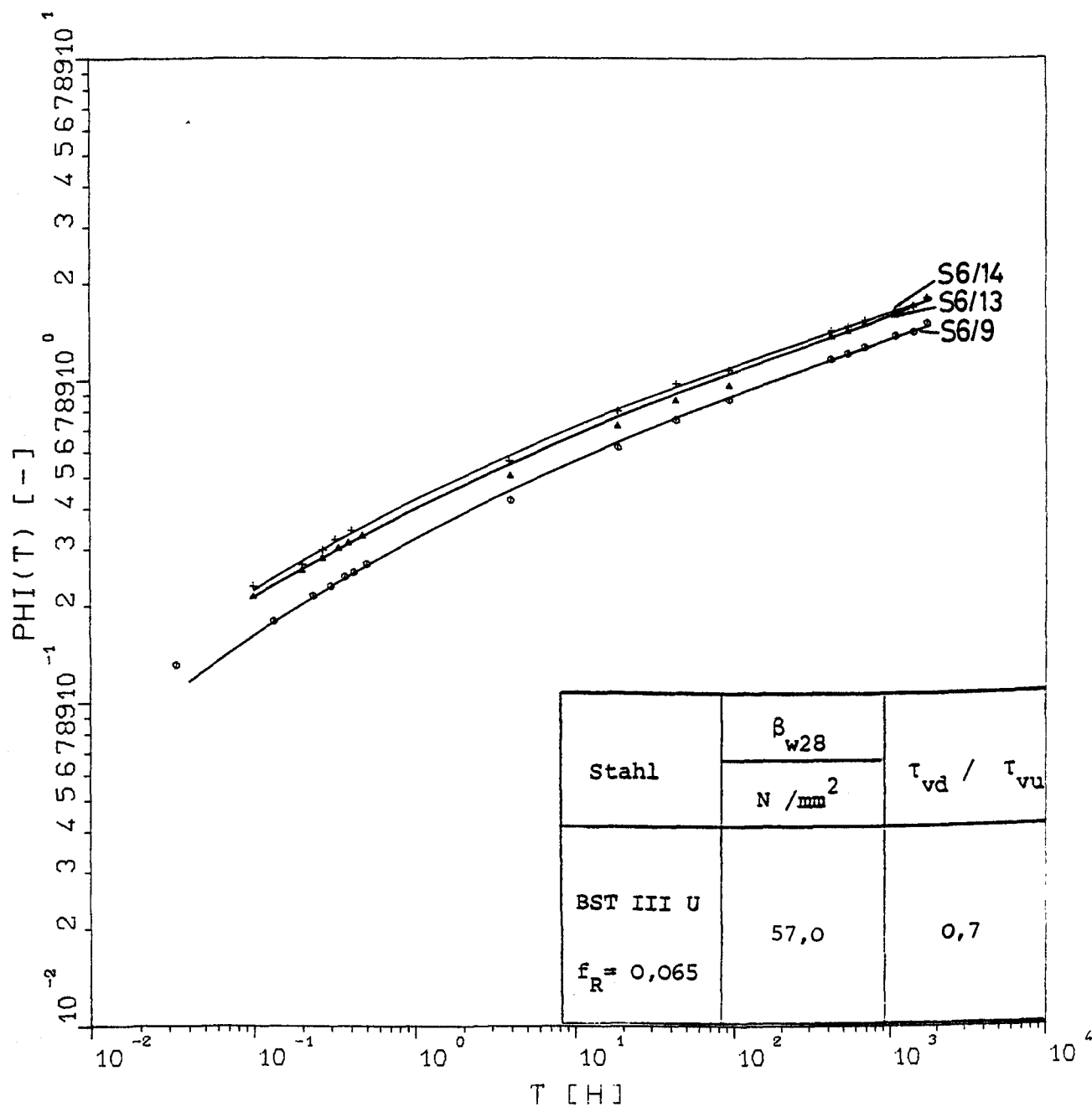
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T (Serie 1, Körper Nr. 2 und 16)



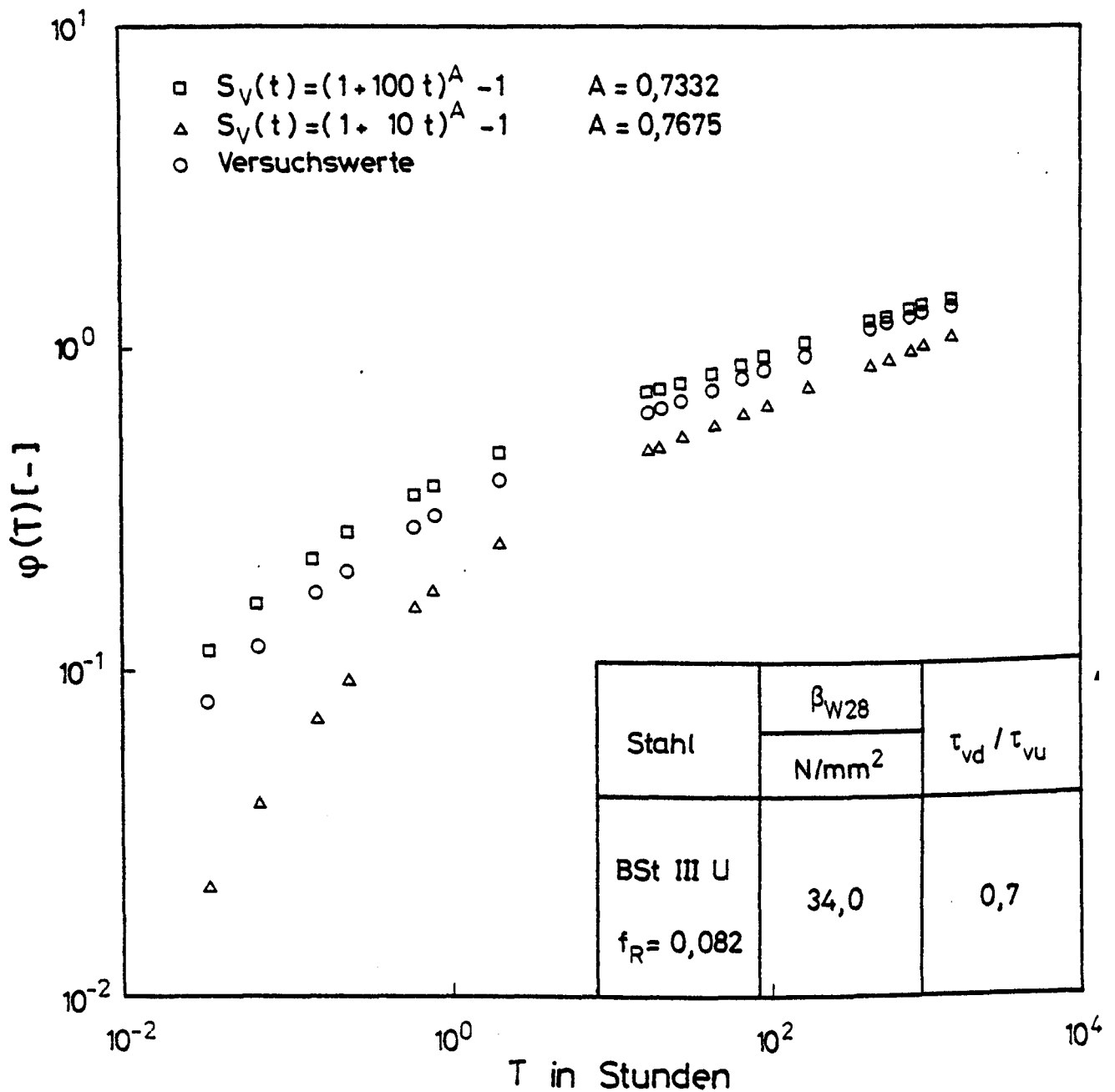
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T (Serie 2,
Körper Nr. 8, 12 und 13)



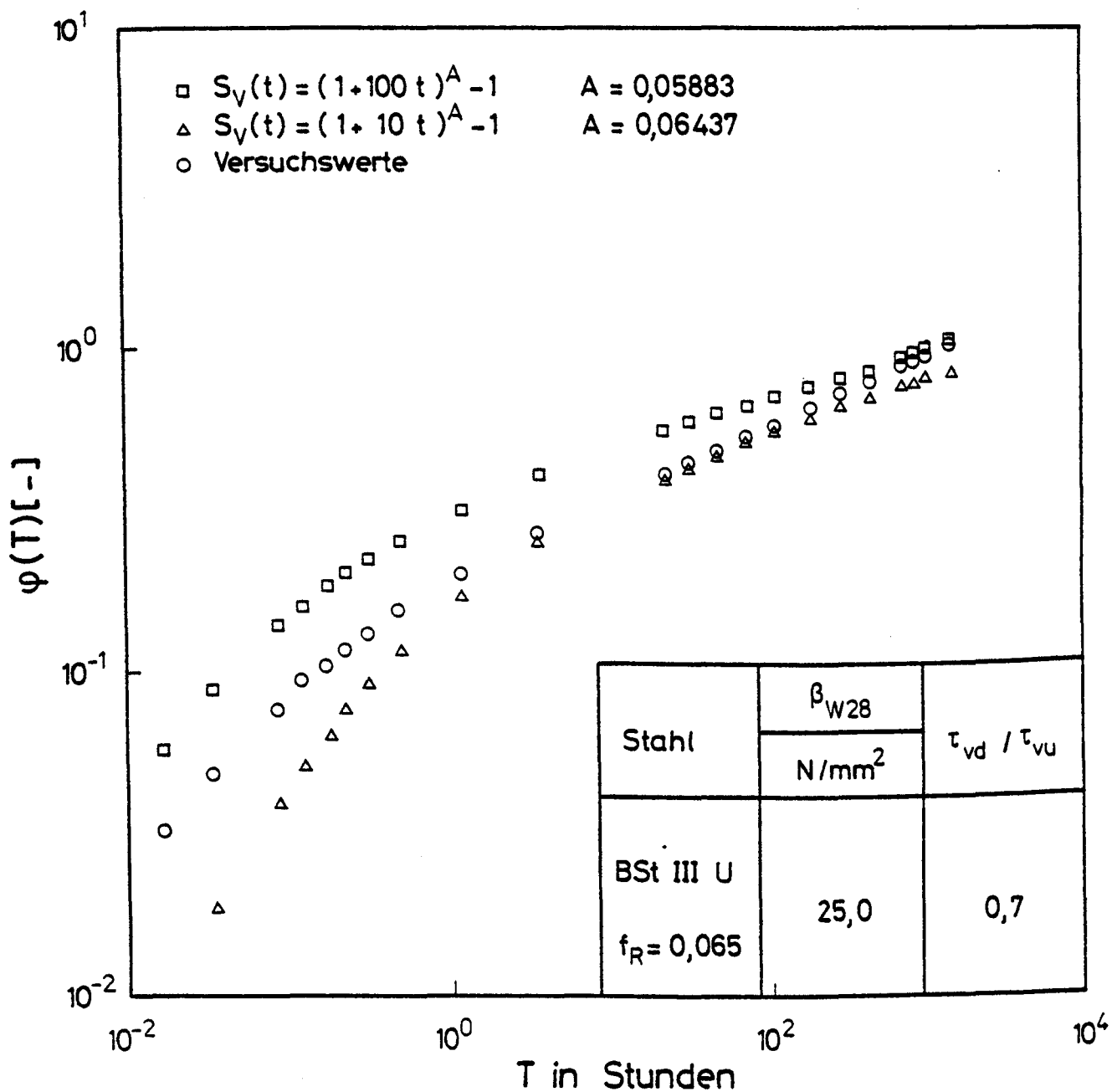
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T (Serie 4, Körper Nr. 1, 3 und 20)



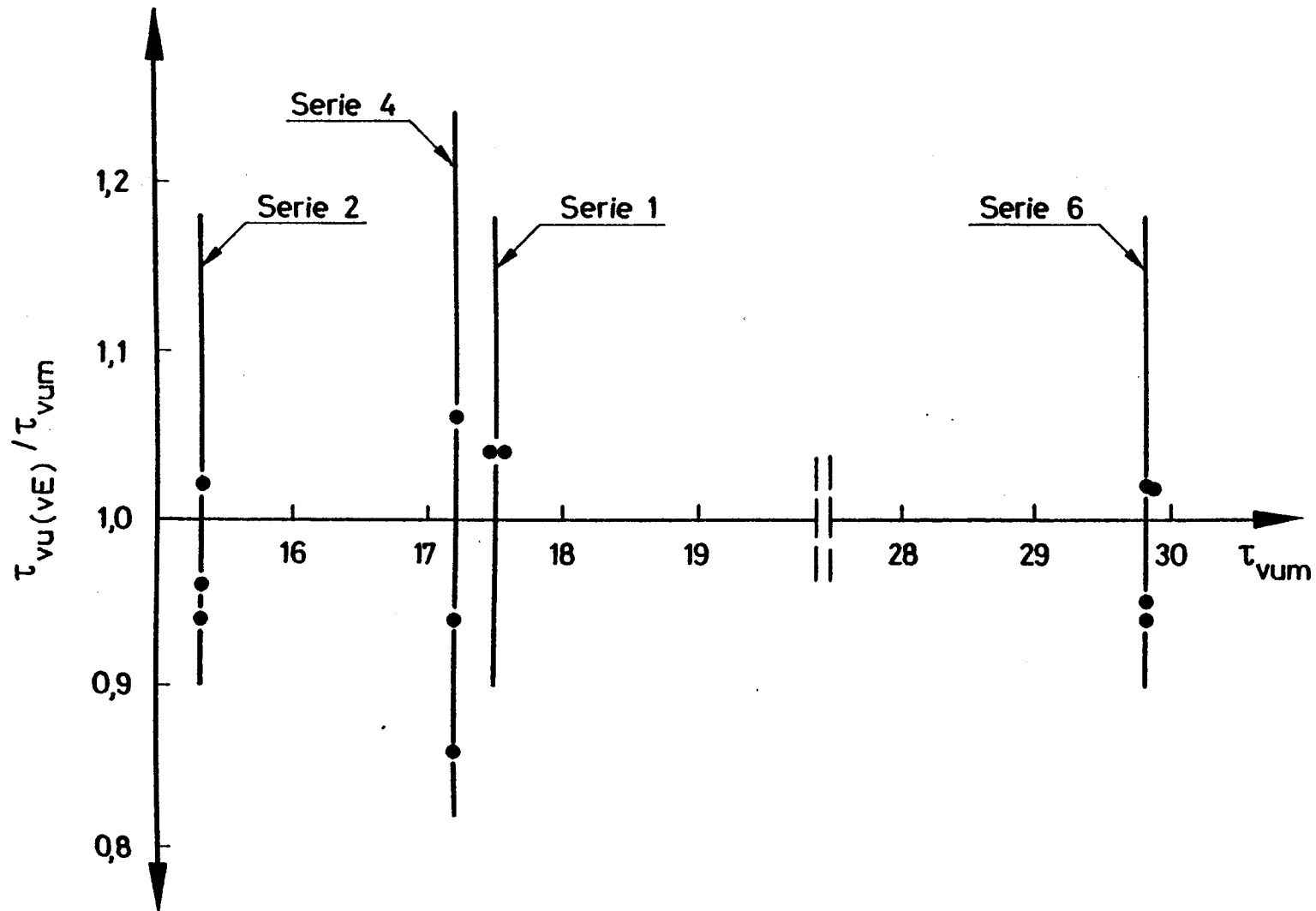
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Belastungsdauer T (Serie 6, Körper Nr. 9, 13 und 14)



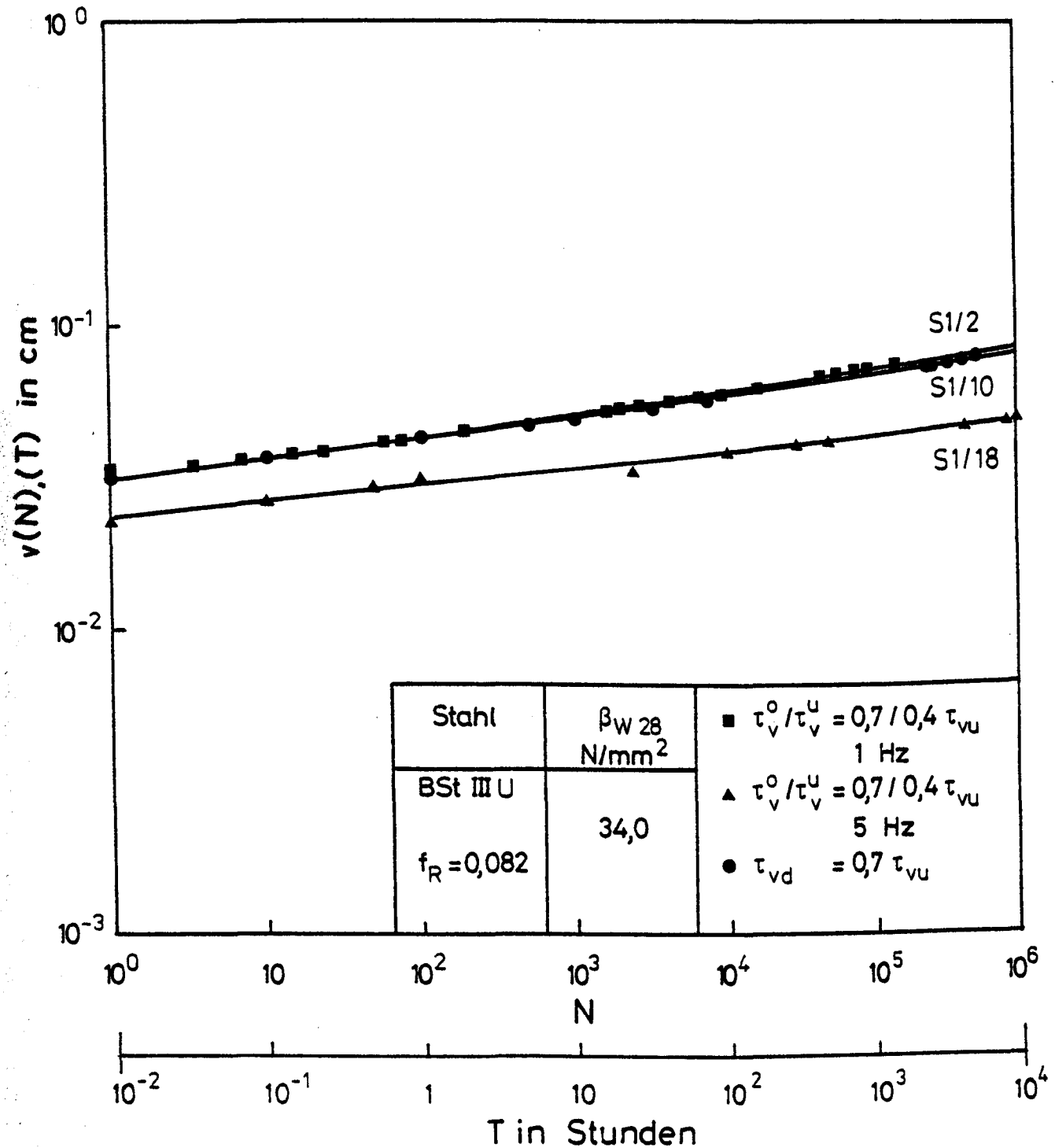
Vergleich von berechneten Kriechzahlen mit Versuchswerten



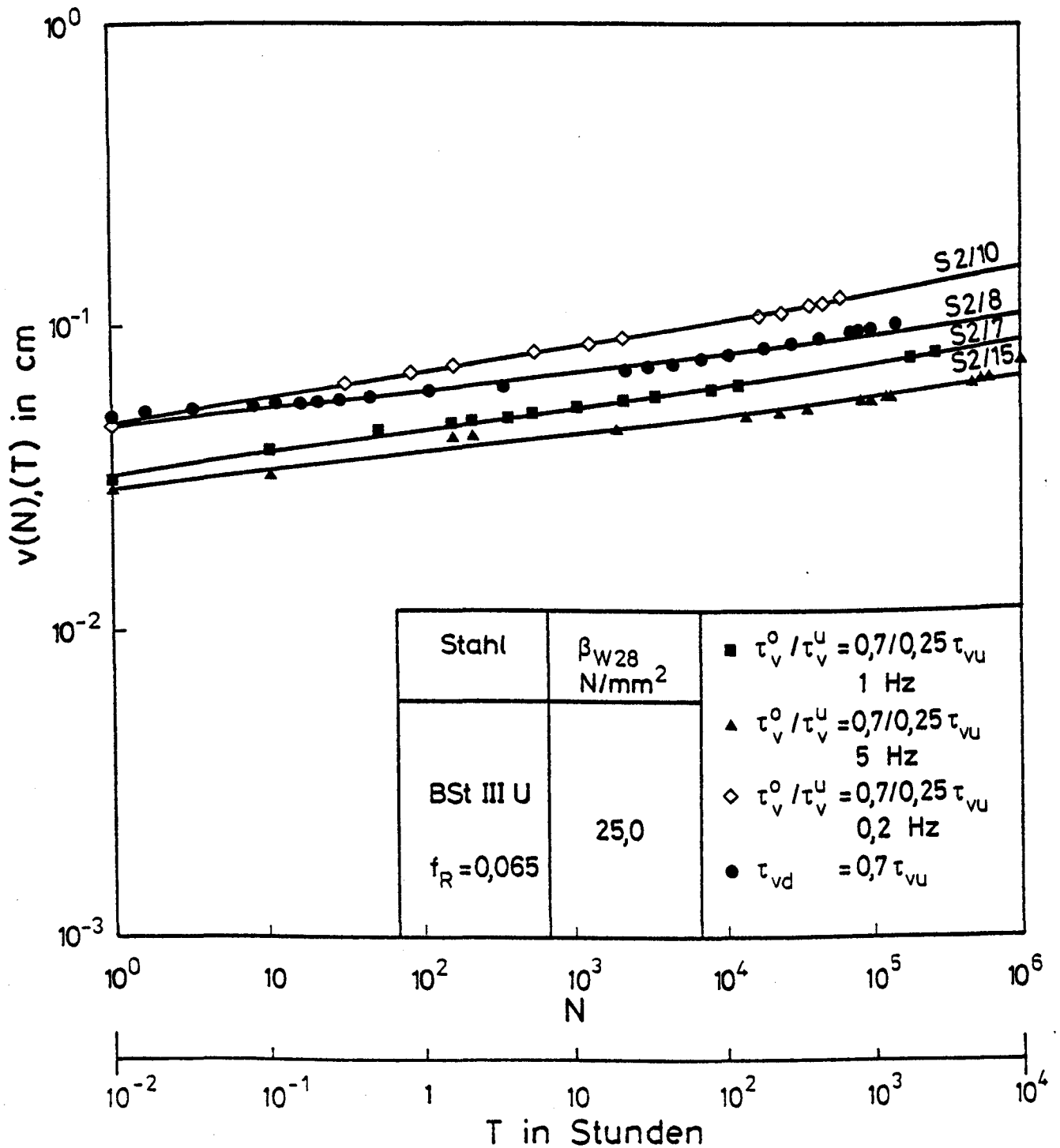
Vergleich von berechneten Kriechzahlen mit Versuchswerten



Vergleich der Verbundfestigkeiten unvorbelasteter und durch eine Dauerlast vorbelasteter Probekörper



Vergleich von Versuchsergebnissen der Zugschwellversuche und der Kriechversuche unter konstanter Dauerlast



Vergleich von Versuchsergebnissen der Zugschwellversuche und
den Kriechversuchen unter konstanter Dauerlast

10/06/2015